Lane Medical Library

Ueber

das Ansteigen der Netzhauterregungen.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doctorwürde

der

hohen philosophischen Facultät

der

Universität Leipzig

vorgelegt

von

Ernst Dürr.

Mit 4 Figuren im Text.

Leipzig
Wilhelm Engelmann
1902.

Sonderabdruck aus Wundt, Philosophische Studien. Bd. XVIII. Heft 2.

Es ist eine seit längerer Zeit bekannte Thatsache, dass die Lichtempfindungen, welche durch einen Reiz von constanter Intensität erregt und unterhalten werden, nicht während der ganzen Dauer ihres Daseins unverändert dieselben bleiben, dass sie vielmehr eine gewisse Zeit lang an Stärke zunehmen bis zu einem Moment, in dem das Maximum der bei dem betreffenden Reiz überhaupt möglichen Erregung erreicht wird, und dass sie dann bei noch längerer Einwirkungsdauer des Reizes wieder schwächer werden.

Ueber den Verlauf des »Ansteigens« der Lichtempfindungen sind eingehendere Untersuchungen bisher besonders durch Exner[1]) und Kunkel[2]) angestellt worden, während die Curve des Abnehmens einer übermaximalen Erregung zuerst durch C. Fr. Müller[3]) festgestellt wurde. Seitdem sind die Thatsachen der Herabsetzung der Empfindungsintensität bei längerer Einwirkung der Lichtreize öfters, namentlich in Arbeiten über Nachbilderscheinungen[4]), mit denen sie ja in engster Beziehung stehen, berücksichtigt worden, während den Phänomenen des Ansteigens der Lichtempfindungen nicht die gleiche Aufmerksamkeit zu Theil wurde.

---

[1]) S. Exner, Ueber die zu einer Gesichtswahrnehmung nöthige Zeit. Wiener Sitzungsber. d. k. Ges. d. W. 1868 S. 601 ff.

[2]) A. Kunkel, Ueber die Abhängigkeit der Farbenempfindung von der Zeit. Pflügers Archiv Bd. IX, S. 197 ff.

[3]) C. Fr. Müller, Versuche über den Verlauf der Netzhautermüdung; Diss. Zürich 1866.

[4]) Vergl. den geschichtl. Abriss der hierher gehörigen Untersuchungen bei W. Wirth, Der Fechner-Helmholtz'sche Satz über negative Nachbilder und seine Analogien. Philos. Studien. XVI, S. 465 ff.

Zweck der vorliegenden Arbeit war nun zunächst eine Nachprüfung und sodann eine Ergänzung der Ergebnisse Exner's und Kunkel's.

Dieser Zweck findet seine vorläufige Rechtfertigung in dem Vorhandensein einer Differenz zwischen den Angaben der bisherigen Bearbeiter einerseits und in einer gewissen Unvollständigkeit ihrer Untersuchungen anderseits, während der Verlauf der Versuche selbst mich überhaupt zu ganz anderen Resultaten führte, als ich nach den Sätzen der früheren Beobachter erwartete.

Die Differenz zwischen Exner und Kunkel betrifft die Methode. Kunkel betont nämlich, dass er auf dem Weg, auf welchem Exner seine Resultate gewonnen hat, seinerseits nicht zu Ergebnissen gelangen konnte[1]). Exner's Verfahren beruht, wie hier nur kurz angedeutet werden soll, auf dem Gedanken, dass zwei gleich intensive Lichtreize, von denen der erste eine kurze, in allen Versuchen constante Zeit vor dem zweiten einzuwirken beginnt, Empfindungen hervorrufen, welche in einem bestimmten Moment gleichzeitig dieselbe Intensität besitzen, indem die eine von ihrem Maximum noch eben so weit entfernt ist, wie die andere dasselbe bereits überschritten hat. Wird also in einer Reihe von Versuchen die Reizung verschiedene, sorgfältig abgestufte Zeit nach Beginn der Einwirkung des ersten Reizes abgebrochen, so wird in dem Fall, wo der Beobachter die beiden Reize als gleich beurtheilt, der Abschluss der Reizung mit jenem Moment zusammenfallen. Bei hinreichend geringer Differenz der Expositionsdauern beider Reize kann man dann jede derselben annähernd der Zeit gleichsetzen, die verstreichen muss, damit eine Empfindung von der Eigenart der betrachteten das Maximum ihrer Intensität erreicht.

Gegenüber dieser Methode Exner's betont Kunkel, dass seine Nachprüfung derselben nicht zu Ergebnissen geführt habe, weil es bei kleiner Differenz der Expositionsdauern objectiv gleicher Reize nicht nur einen Moment oder auch nur eine begrenzte Zeitstrecke gebe, wo dieselben auch subjectiv gleich erscheinen, sondern unendlich viele derartige Zeitpunkte, da in allen Fällen, in denen beide Empfindungen ihr Maximum überschritten hätten, eine Verschieden-

[1]) Kunkel a. a. O. S. 201.

heit derselben nicht mehr zu constatiren sei. Um die Bedeutung dieses Einwands, wenn er thatsächlich zu Recht besteht, richtig zu beurtheilen, muss man noch bedenken, dass Exner den Moment bester Gleichheit der betrachteten Empfindungen, den Durchschnittspunkt der beiden Curven bei graphischer Darstellung des Verlaufs der Erregungen, nicht direct durch Beobachtung findet, sondern durch das arithmetische Mittel jener Grenzwerthe der Expositionszeiten berechnet, außerhalb deren die Empfindungen in entgegengesetztem Sinne verschieden erscheinen, innerhalb deren eine Variation der Einwirkungsdauern der Reize die Gleichheit jedoch nicht beeinträchtigt. Dieses Verfahren würde nach Kunkel unbrauchbar sein. Eine eventuelle Stellungnahme in dieser Controverse aber kann sich nur auf eine nochmalige Nachprüfung der Exner'schen Methode gründen.

Das Verfahren Kunkel's unterscheidet sich von dem Exner'schen dadurch, dass er objectiv verschiedene Reize mit verschiedener Differenz der Expositionsdauern verwendet und die Zeiten bestimmt, welche sie einwirken müssen, um gleichzeitig die gleiche Empfindungsstärke hervorzurufen. Diese Methode gründet sich auf einen von Exner aufgestellten Satz, wonach dem stärkeren Reiz eine rascher ansteigende Empfindung entsprechen soll als dem schwächeren, so dass nicht nur in Augenblicken, wo die früher beginnende Empfindung ihr Maximum schon überschritten hat, sondern auch in Momenten, wo dasselbe noch nicht erreicht ist, die später beginnende ihr gleich erscheinen kann. Nach dieser Methode ist also die Zeit, nach welcher beide Reize als gleich beurtheilt werden, nicht ohne weiteres ein Maß der Dauer des Ansteigens, sondern aus einer Reihe solcher Zeiten muss diejenige erst herausgefunden werden, nach welcher der zuerst einwirkende Reiz gerade das Maximum seiner Erregung hervorgerufen hat. Als Kriterium dafür dient Kunkel auf Grund einer naheliegenden Ueberlegung die relative Größe und die bei einer gewissen Verschiebung der Differenz der Expositionsdauern beider Reize auftretende Constanz der Einwirkungszeit des späteren (intensiveren) Reizes, die, vermehrt um die Differenz der Expositionsdauern, nun als Maß für die Zeit des Ansteigens der Gesichtsempfindungen gelten kann. Daraus ist aber wohl ohne weiteres ersichtlich, dass auch Kunkel's Methode an Einfachheit manches zu wünschen übrig lässt und vor der Exner'schen Verfahrungsweise

nur dann den Vorzug verdient, wenn die letztere überhaupt nicht zum Ziele führt.

Aber auch positive Mängel, nicht bloß unentschiedener Streit über die Methode, legten eine nochmalige Bearbeitung des in Rede stehenden Thatsachengebietes nahe. Während nämlich Exner die Curve des Ansteigens nur für die durch weißes Licht erregten Gesichtsempfindungen bestimmt, wendet Kunkel seine Aufmerksamkeit nur den Farbenempfindungen zu. Eine Vergleichung der zum Ansteigen der verschiedenen Farben- und reinen Helligkeitsempfindungen von gleicher Intensität nöthigen Zeiten liegt meines Wissens überhaupt noch nicht vor. Hieraus ergibt sich ein weiteres Problem, dem wir im Folgenden Beachtung schenken wollen.

Außerdem sind die Adaptationsverhältnisse weder in Exner's, noch in Kunkel's Versuchen völlig eindeutig bestimmt. Exner scheint auf eine Constanz der vor jedem Versuch vorhandenen Beleuchtung gar kein besonderes Gewicht gelegt zu haben. Kunkel bemerkt, dass er im »fast absolut dunkeln« Raum beobachtet habe, eine Angabe, deren Genauigkeit kaum genügt, so lange die Frage nach der Wichtigkeit von Adaptationsschwankungen für den Verlauf der zu untersuchenden Processe nicht entschieden ist. Ich stellte daher eine Versuchsreihe in völliger Dunkeladaptation, eine andere bei constant gehaltener Helladaptation an, auf deren nähere Bedingungen bei der Beschreibung der Versuchsanordnung zurückzukommen sein wird.

Einige mehr untergeordnete Punkte der in Rede stehenden Mittheilungen Exner's und Kunkel's, welche die Kritik herausfordern, sind endlich folgende: Beide Beobachter vernachlässigen die möglicherweise vorhandene Einwirkung des Simultancontrastes auf das Ansteigen der zuerst beginnenden Lichtempfindung, indem diese zunächst durch einen weißen neben einem schwarzen Halbkreis ausgelöst wird, während der an zweiter Stelle gebotene Reiz von Anfang an nur neben einem gleichfalls hellen Feld erscheint. Dies mag bei Exner, wo die Differenz der Expositionsdauern, also die Zeit, während welcher jener Simultancontrast das Ansteigen der zuerst beginnenden Empfindung begünstigen kann, kurz und insbesondere constant ist, verhältnissmäßig wenig bedeuten. Bei Kunkel aber könnte dieser Umstand in Folge der Variabilität jener Zeit die

Resultate immerhin merkbar beeinflussen. Ferner sind bei der Versuchsanordnung von Exner und Kunkel, wo die zu vergleichenden Reize unmittelbar an einander grenzen, Irradiationserscheinungen nicht ausgeschlossen. Auch dies mag an sich unbedeutend erscheinen besonders gegenüber der Erleichterung, welche für die Helligkeitsvergleichung zweier Flächen aus der unmittelbaren Berührung derselben erwächst. Aber wenn Exner aus einem hellen Randstreifen, den er in gewissen Fällen beobachtet, Schlussfolgerungen auf die Helligkeit des ganzen Feldes zieht und gerade dadurch das constatirt, was Kunkel nicht beobachten kann, eine Verschiedenheit solcher durch gleiche Reize erregten Empfindungen von geringer Differenz der Dauern, die das Maximum ihrer Intensität bereits überschritten haben[1]), so liegt die Vermuthung nahe, dass gerade jener unbedeutende Effect hier eine schädliche Wirkung auf die Feststellung wichtiger Thatsachen ausgeübt hat. Um daher die beiden letztgenannten Uebelstände zu vermeiden, entschloss ich mich, auf eine unmittelbare Nachbarschaft der zu vergleichenden Lichtreize zu verzichten.

I. Versuche bei Dunkeladaptation.

1. Bei gleicher objectiver Helligkeit von Normalreiz und Vergleichsreiz und constanter Differenz der Expositionsdauern.

Meine Versuchsanordnung machte im Lauf der Zeit mehrere Wandlungen durch. Da nur die letzten Modificationen derselben zu brauchbaren Resultaten führten, so sollen die ersten Stadien ihrer Entwicklung hier nur in so weit eine kurze Besprechung finden, als sie für die oben aufgeworfene Frage nach der Methode nicht ohne Interesse zu sein scheinen. Der Haupttheil der ersten und der nächstfolgenden Versuchsanordnungen bestand in einem großen schwarzen Cylindermantel von etwa 30 cm Breite, der auf dem Umfang eines großen, um eine horizontale Axe drehbaren Rades von etwa 1 m (0,99 cm) Durchmesser befestigt war.

Die Dauer der Lichteindrücke wurde nun in einer ersten Reihe von Versuchen bestimmt durch zwei 1 cm von einander abstehende

[1]) Exner, Separatabdruck der citirten Arbeit, S. 15.

parallele, etwa 1,5 cm breite Ausschnitte von variabler Länge in jenem Cylindermantel, in dessen Mittelpunkt die Lichtquelle (ein in schwarzem Kästchen eingeschlossenes elektrisches Glühlämpchen, welches durch eine doppelte Mattglasscheibe, von der die eine Wand des Kästchens gebildet wurde, Licht aussandte) sich befand. Die Ausschnitte waren mit Transparentpapier bedeckt und wurden durch ein schwach vergrößerndes Fernrohr betrachtet. Der Beobachter sah nun, wenn der Cylinder durch einen Elektromotor in gleichförmige, nicht sehr schnelle Rotation versetzt wurde, völlige Dunkelheit, so lange keiner der beiden Ausschnitte in das Sehfeld des Fernrohres gerückt wurde. Im weiteren Verlauf einer Umdrehung des Radcylinders tauchte dann, je nachdem man den linken oder rechten der beiden Ausschnitte stärker verkürzt hatte, rechts oder links im Gesichtsfeld des Beobachters ein heller Streifen auf, neben dem in einigem Abstand kurze, in allen Versuchen constant gehaltene Zeit später ein zweiter Streifen von gleicher objectiver Helligkeit erschien, bis beide zu gleicher Zeit wieder verschwanden. Da das Fadenkreuz des Fernrohrs auf dem dunkeln Hintergrund, auf dem die Lichtreize geboten wurden, nicht sichtbar war, so wurde noch ein Fixationspunkt in gleichem Abstand von den Stellen, wo die hellen Streifen erschienen, im Beobachtungsfeld angebracht. Ohne die Fixation dieses Punktes aufzugeben, sollte nun der Beobachter in dem Augenblick, wo beide Lichtreize verschwanden, entscheiden, ob der rechts oder der links vom Fixationspunkt erschienene Reiz schließlich heller gewesen sei.

Aber es zeigten sich nun eine Menge psychologischer Schwierigkeiten: Ist es nämlich an sich bekanntlich schwerer, zwei Lichtreize auf ihre Helligkeit zu vergleichen, die räumlich nicht unmittelbar neben einander liegen, als Helligkeitsunterschiede angrenzender Objecte zu constatiren, und ist es ferner eine öfter hervorgehobene Schwierigkeit, die Aufmerksamkeit auf nicht fixirte Objecte zu richten, so wird das Verfahren nicht erleichtert, wenn es sich darum handelt, die Aufmerksamkeit bei festgehaltenem Fixationspunkt wandern zu lassen, wie dies zur Vergleichung räumlich getrennter Gesichtseindrücke in unserem Fall nöthig ist, und wenn diese räumlich getrennten Lichtreize obendrein nicht ruhende, sondern schnell vorübergehende Objecte sind. Dazu kommt schließlich noch die Schwierigkeit,

überhaupt den Fixationspunkt festzuhalten, wenn sich im dunklen Gesichtsfeld ein Lichtreiz blitzartig von oben nach unten bewegt.

So verlief denn eine erste Reihe von Versuchen, bei welcher im Anschluss an die Exner'sche Methode die Differenz der Expositionsdauern beider Reize klein und constant erhalten wurde, vollkommen resultatlos. Der Beobachter enthielt sich in den meisten Fällen des Urtheils. In den wenigen Fällen aber, wo Urtheile überhaupt abgegeben wurden, gestalteten sich dieselben vollkommen regellos, ohne jede erkennbare Beziehung zu dem Verhältniss oder zu der absoluten Dauer der Expositionszeiten.

2. Versuche bei gleicher objectiver Helligkeit von Normalreiz und Vergleichsreiz und variabler Differenz der Expositionsdauern.

Ich entschloss mich nun, die Differenz der Expositionsdauern zu vergrößern und zu variiren, um womöglich eine Anzahl Gleichungen zwischen solchen Lichtempfindungen, die ihr Intensitätsmaximum bedeutend überschritten haben, und solchen, die noch weit unter demselben geblieben sind, festzustellen. Die Versuche, die ebenso wie die vorausgehenden bei Dunkeladaptation angestellt wurden, fanden unter Beobachtung aller möglichen Vorsichtsmaßregeln zur Ausschließung von Fehlerquellen statt. Nachdem der Beobachter sich 15 Minuten lang in der Dunkelkammer aufgehalten hatte wurden, ihm die beiden Lichtreize ruhend zur Vergleichung geboten. Durch eine geringe Verschiebung der Lichtquelle im Innern des die Dauer der Lichtreize bestimmenden Radcylinders nach rechts oder links konnte eine anfängliche Ungleichheit in der Helligkeit der beiden weißen Streifen leicht ausgeglichen werden. Wurden dieselben dann als gleich beurtheilt, so blieben sie während der an dem betreffenden Tag angestellten Versuchsreihe völlig ungeändert. Was den Einfluss der Raumlage beider Reize betrifft, so ließ sich a priori erwarten, dass derselbe in den Versuchen keine Fehlerquelle abgeben werde, da er, wenn er überhaupt sich geltend machte, bereits in der anfänglichen Gleichheitseinstellung beseitigt wurde. Ueberdies hatte aber auch die oben erwähnte, im übrigen resultatlos verlaufene Versuchsreihe, bei welcher bald der rechte, bald der linke Reiz kürzer bezw. länger geboten wurde, dies eine gezeigt, dass ein regelmäßiger

Einfluss der Raumlage nicht zu constatiren sei. Da wir es in allen folgenden Versuchen nur mit subjectiven Helligkeiten und ihrem Verhältniss zu thun haben, so scheint es gerechtfertigt, wenn wir diese Frage damit für erledigt halten. Auf die objectiven Helligkeiten wurde natürlich in so fern auch stets Rücksicht genommen, als die Stärke des die Lichtquelle versorgenden Stromes und die Entfernung der Lichtquelle von den durch sie versorgten Lichtreizen, den mit Transparentpapier bedeckten Ausschnitten des Radcylinders, sowie der Abstand des Fernrohrs und des Beobachters von den beiden Lichtreizen constant erhalten wurde. Die Versuche, die mit demselben Beobachter an einem Tage ausgeführt wurden, dauerten jedes Mal ungefähr eine Stunde. Während dieser Zeit wurde die Dunkeladaptation nicht aufgegeben. Nach jedem einzelnen Versuch fand eine etwa fünf Minuten lange Pause statt, damit die subjectiven Lichterscheinungen, die sich an den einen Versuch anschlossen, die Ergebnisse des folgenden nicht beeinträchtigten. Die zu jedem Versuch erforderlichen Verrichtungen wurden im Dunkeln besorgt. Wenn es dann und wann doch nöthig war, Licht zu machen, musste der Beobachter die Augen mit einem schwarzen Tuch bedecken. Auch wurde in diesem Fall vor dem nächsten Versuch eine etwas längere Pause gewählt.

Auf diese Weise führte ich im Wintersemester 1900/01 eine große Reihe von Versuchen aus, bei denen die Herren Dr. Wirth, Heidenhain und Viktoroff als Beobachter fungirten. Aber das Resultat war im wesentlichen ein negatives. Es zeigte sich nämlich, dass unter den beschriebenen Verhältnissen, wenn zwei objectiv gleiche, nicht unmittelbar an einander grenzende Reize verschieden lange Zeit dem Beobachter geboten werden, nicht ein Lichteindruck von bestimmter Dauer, der sein Intensitätsmaximum noch nicht erreicht hat, einem Lichteindruck von constanter längerer Einwirkungszeit, der bereits an Stärke abnimmt, gleich erscheint, sondern dass einem und demselben Helligkeitswerth des länger exponirten Reizes, etwa dem bei einer Expositionszeit von 1,60 Secunden vorhandenen, die Helligkeit des kürzer gebotenen Reizes nach den verschiedensten Einwirkungsdauern von 0,015—0,103 Secunden als gleich groß zugeordnet wird.

Damit soll natürlich nicht gesagt sein, dass aus unseren

Ergebnissen ein Argument gegen die von Exner und Kunkel gefundene Gesetzmäßigkeit überhaupt entnommen werden könne. Vielmehr zeigten sich die allgemeinsten Züge jener Gesetzmäßigkeit auch in unseren Resultaten wenigstens in so fern, als bei zunehmender Expositionszeit des kürzeren und gleichbleibender Dauer der Einwirkung des längeren Reizes die Fälle seltener vorkamen, in denen der Beobachter den kürzeren Reiz als dunkler beurtheilte.

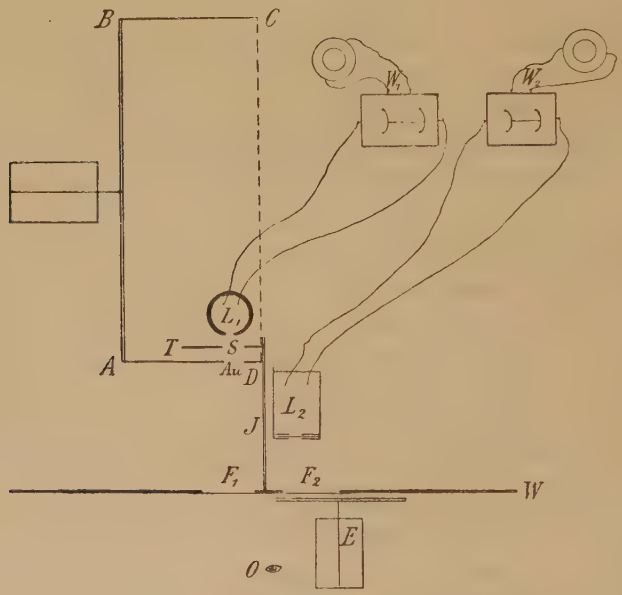
Hat man nun aber ein Recht, einen ähnlichen Verlauf der Lichtempfindungen, wie ihn Exner und Kunkel behaupten, auch in unseren Versuchen anzunehmen, so kann man das mitgetheilte Ergebniss derselben auch so formuliren, dass der ganze Intensitätszuwachs, welchen der kürzer exponirte Reiz bei einer von 0,015 bis 0,110 Secunden verlängerten Einwirkungszeit der zugehörigen Empfindung zu Theil werden lässt, die Unterschiedsschwelle nicht überschreitet. Dabei bedeutet natürlich, wie ohne weiteres ersichtlich ist, die Breite dieser Unterschiedsschwelle nicht eine Reizdifferenz, welche in der Empfindung, sondern eine Empfindungsdifferenz, welche in der Auffassung nicht zur Geltung kommt. Eine solche Größe der Unterschiedsschwelle für die durch zwei ungleichzeitig erscheinende, kurz dauernde, durch das Gesichtsfeld bewegte und im indirecten Sehen beobachtete Gesichtsreize ausgelösten Empfindungen macht nun aber die bisher festgehaltene Methode für die hier vorliegende Untersuchung unbrauchbar.

Eine neue Versuchsanordnung.

Die beschriebene Methode unterscheidet sich jedoch von der Exner'schen nicht nur in Punkten, wo eine Verbesserung gewünscht wurde, sondern auch in einem Umstand, der möglicher Weise schädlich wirken konnte, darin nämlich, dass die zu vergleichenden Objecte sich durch das Gesichtsfeld bewegten. Die Grundzüge einer neuen Versuchsanordnung, in welcher dieser Uebelstand vermieden wurde, sollen, da sie unverändert in die definitive Versuchsanordnung übernommen wurden, eine etwas eingehendere Darstellung finden. Zur Erläuterung dient Figur 1, welche die endgültige Anordnung im Grundriss wiedergibt.

Die Stellung des Beobachters ist angedeutet durch das Auge *O*. Als ruhende Vergleichsobjecte dienten zwei 5.3 cm² große, mit

Transparentpapier bedeckte Ausschnitte (in der Projection angedeutet durch F_1 und F_2) in einer Wand aus schwarzer Pappe (W). Zwischen beiden Fensterchen, auf dem etwa 1 cm breiten schwarzen Trennungsstreifen, war ein Fixationspunkt angebracht. Da die Fenster verschieden lange Zeit beleuchtet werden sollten, schien es zweckmäßig, jedes durch eine eigene Lichtquelle zu versorgen. Die Lichtquelle L_1, welche dem Fenster F_1 (wir wollen es den Vergleichsreiz nennen)



Figur 1.

zugetheilt war, bestand in einer gewöhnlichen birnförmigen elektrischen Glühlampe, die, nach allen anderen Seiten abgeblendet, nur durch ein kreisförmiges Loch der umhüllenden Kapsel Licht auf das zu erleuchtende Fenster warf. Die Dauer der Einwirkung dieses Lichtes auf den Vergleichsreiz wurde dadurch bestimmt, dass der oben schon erwähnte Cylindermantel (in der Projection durch das Viereck $ABCD$ angedeutet) um die Lichtquelle rotirte und nur so lange eine Beleuchtung von F_1 ermöglichte, als ein in ihm angebrachter Ausschnitt (Au) von einigen Centimetern Breite und variabler Länge den von L_1 kommenden Lichtstrahlen den Durchtritt erlaubte.

Damit die Erleuchtung des Vergleichsreizes (F_1) möglichst momentan mit voller Stärke einsetzte, sobald der Ausschnitt des Radcylinders den Weg der Lichtstrahlen kreuzte, mussten die letzteren, bevor sie durch den Ausschnitt weitergingen, noch einen schmalen Spalt (S) in einer der Peripherie des Radcylinders möglichst nahe gerückten undurchsichtigen Wand (T) passiren. Alle übrigen Lichtstrahlen, welche nicht durch diesen Spalt und den Ausschnitt des Radcylinders während der gewünschten Expositionszeit auf das Fenster F_1 fielen, wurden sorgfältig abgeblendet. Vor allem sorgte eine unter rechtem Winkel zwischen den Fenstern F_1 und F_2 an die Wand W stoßende Scheidewand (J) dafür, dass kein Licht von der Lichtquelle L_1 das Fenster F_2 erleuchten konnte. Dieses letztere (F_2) wurde versorgt von der Lichtquelle L_2, einem kleinen elektrischen Glühlämpchen in schwarzer Kapsel, welches durch einen schmalen, mit einer Mattglasscheibe bedeckten Spalt Licht aussandte. Die Expositionszeit von F_2 (wir wollen es als Normalreiz bezeichnen) wurde durch Oeffnen und Schließen eines Stromschlüssels (W_2) regulirt, welcher in den das elektrische Lämpchen versorgenden Stromkreis eingeschaltet war.

Dieses Oeffnen und Schließen besorgte der Experimentator auf ein Signal hin, welches durch den die Einwirkungsdauer des Vergleichsreizes regulirenden Radcylinder in dem Augenblick ausgelöst wurde, wo die Zeit des Vergleichsreizes gerade abgelaufen war. Die andere Lichtquelle (L_1) leuchtete übrigens auch nicht continuirlich, sondern wurde ebenfalls durch Schließen eines in ihren Stromkreis eingeschalteten Stromschlüssels (W_1) kurz vor dem Zeitpunkt entzündet, wo die Einwirkung des zugehörigen Reizes beginnen sollte.

Jeder Versuch vollzog sich also in der Weise, dass nach einem dem Beobachter zugerufenen »Jetzt« auf das vom rotirenden Radcylinder ausgelöste Signal hin zunächst durch Schließen des einen Stromkreises der (länger einwirkende) Normalreiz geboten wurde. Mit ihm zugleich erschien der Fixationspunkt auf dem Verbindungsstreifen zwischen F_1 und F_2. Dann wurde je nachdem bei der ersten, zweiten, dritten Umdrehung des Radcylinders, was sich leicht an den auf einander folgenden Signalen bestimmen ließ, die zweite Lichtquelle entzündet, und kurz darauf begann die Einwirkungszeit des Vergleichsreizes. Sowie endlich das Verschwinden des letzteren durch ein weiteres Signal angezeigt wurde, genügte ein Oeffnen des Strom-

schlüssels W_2, um auch den Normalreiz annähernd gleichzeitig verschwinden zu lassen. Genau genommen erleidet die Expositionszeit des Normalreizes gegenüber der durch Signale begrenzten Zeit eine kleine Verschiebung um die für das Schließen und Oeffnen des Stromschlüssels in Betracht kommende Reactionsdauer. Aber durch die Gewöhnung an den Rhythmus der auf einander folgenden Signale gelang es, nahezu gleichzeitig mit dem Ertönen derselben die erforderlichen Handgriffe auszuführen, so dass die Reactionszeit wohl unbedenklich vernachlässigt werden kann, zumal die Expositionszeit des Normalreizes in allen Versuchen so groß gewählt wurde, dass kleine Schwankungen derselben keinen wesentlichen Einfluss auf die Intensität der Empfindung ausüben konnten. Wir setzen also die Expositionszeiten des Normalreizes gleich der Umdrehungsdauer des Radcylinders bezw. Vielfachen derselben. Die Einwirkungszeiten des Vergleichsreizes aber lassen sich völlig exact berechnen aus der Rotationsgeschwindigkeit und der jeweiligen Länge des Ausschnittes im Cylindermantel.

Mit dieser Versuchsanordnung wurde unter Beobachtung der nöthigen Vorsichtsmaßregeln zur Ausschaltung von Fehlerquellen zunächst eine Reihe von Versuchen in der Weise ausgeführt, dass zu Beginn jedes Versuchstages die beiden Lichtreize dem Beobachter gleichzeitig und gleich lange geboten und auf gleiche Helligkeit eingestellt wurden. Die Wiedergabe der die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zusammenfassenden Tabelle kann ich mir indessen ebenso ersparen wie bei den früher erwähnten Versuchen. Es zeigt sich zwar abermals die allgemeinste Andeutung der von Exner gefundenen Gesetzmäßigkeit, indem bei zunehmender Expositionszeit des Vergleichsreizes und gleichbleibender des Normalreizes die Fälle seltener werden, in denen der letztere heller erscheint als der erstere. Aber das Urtheil »heller« enthält kein Maß für die Helligkeitsdifferenz, und die Gleichheitsurtheile, die allein ein exactes Maß in sich schließen, setzen auch auf Grund dieser Resultate wieder einen und denselben Helligkeitswerth des Normalreizes zu so verschiedenen Werthen des Vergleichsreizes in jene eindeutige Beziehung, dass damit die Unbrauchbarkeit dieser Methode der Vergleichung objectiv gleicher Reize von verschiedener Expositionszeit erwiesen scheint.

3. Versuche mit objectiv verschiedenen Reizen und variabler Differenz der Expositionsdauern. Normalreiz > Vergleichsreiz.

A. Farblose Lichtreize.

Ich benutzte nun dieselbe Versuchsanordnung zur Ausführung von Versuchen, bei denen Normalreiz und Vergleichsreiz objectiv verschieden waren, während die Folgen dieser objectiven Intensitätsunterschiede für die Empfindung durch den Einfluss verschieden langer Einwirkung auf das Sinnesorgan (subjectiv) ausgeglichen werden sollten. Zur Messung und Variation der Helligkeit diente ein vor dem Normalreiz angebrachter Episkotister[1]) (*E* in Fig. I), ein Rotationsapparat, an dem schwarze Scheiben mit ausgeschnittenen Sectoren von variabler Breite hinreichend schnell sich drehten, um den Normalreiz in gleichmäßig verminderter Helligkeit erscheinen zu lassen. Dieser Episkotister wurde nun zunächst zur Einstellung einer bestimmten Helligkeit des Normalreizes benutzt, indem die Beleuchtungsstärke des letzteren durch die zugehörige Lichtquelle für eine gegebene Sectorenbreite des Episkotisters so lange variirt wurde, bis der verdunkelte Normalreiz dem gleichzeitig und gleich lange gesehenen Vergleichsreiz gerade gleich erschien. Hierauf diente der Episkotister dazu, bei unveränderter Beschaffenheit und Lage der Lichtquelle durch Variation seiner Sectorenbreite die Helligkeit des Normalreizes zu variiren, so dass der letztere nach einer in allen Versuchen constant gehaltenen Expositionszeit dem in verschiedenen Versuchen verschieden lange einwirkenden Vergleichsreiz gerade gleich erschien. Die subjective Helligkeit des Vergleichsreizes ließe sich dann in jedem Fall ausdrücken durch den Quotienten aus der vom Episkotister durchgelassenen Lichtmenge und der Lichtstärke des ohne Episkotister betrachteten Normalreizes, vermindert um den Helligkeitsverlust, welchen der durch den Episkotister gesehene Normalreiz in Folge der Netzhautermüdung erleidet. Eine solche absolute Messung ist indess besonders wegen der letzten in die Rechnung eingehenden Größe mit bedeutenden Schwierigkeiten verknüpft. Wir entgehen diesen Schwierigkeiten, wenn wir uns auf die Bestimmung derjenigen

---

[1]) Auf die Zweckmäßigkeit einer Anwendung dieses nützlichen Instrumentes machte mich zuerst Herr Dr. Wirth, einer meiner Beobachter, aufmerksam.

Expositionszeit des Vergleichsreizes beschränken, bei welcher die zugehörige Empfindung gerade das Maximum ihrer Intensität erreicht. Diese Zeit ist uns ohne weiteres gegeben in derjenigen Einwirkungsdauer des Vergleichsreizes, bei welcher dieser einer möglichst großen objectiven Helligkeit des Normalreizes (einer bei möglichst großer Beleuchtungsstärke möglichst geringen Verdunkelung desselben durch den Episkotister) gleich erscheint, in so fern wir voraussetzen dürfen, dass nach gleicher Expositionszeit ein objectiv intensiverer Reiz trotz größerer Netzhautermüdung immer noch heller erscheint als ein objectiv schwächerer von geringerer Ermüdungswirkung.

Nun könnte man im Anschluss an unsere früheren Erörterungen über die Methode freilich die Frage erheben, worin denn eigentlich der Vorzug des zuletzt beschriebenen Verfahrens vor dem als unbrauchbar verworfenen bestehe, warum die geringe Unterschiedsempfindlichkeit, welche bei den früher erwähnten Versuchen die Helligkeit des Vergleichsreizes bei den verschiedensten Expositionszeiten demselben Helligkeitswerth des Normalreizes gleich erscheinen ließ, nicht auch bei dieser Methode einem und demselben Normalreiz verschiedene Werthe des Vergleichsreizes zuordnen lasse. Von der Beantwortung dieser Frage kann natürlich der erfahrungsgemäß feststehende Werthunterschied beider Methoden nicht weiter beeinflusst werden. Aber ein Erklärungsgrund für diesen Werthunterschied liegt so nahe, dass wir ihn hier wenigstens kurz streifen können. Bei allen früheren Methoden nämlich waren die Abstufungen der Intensität der Normalempfindung lediglich subjectiv bedingt auf Grund verschiedener Expositionsdauer des Reizes. Sie wurden mit den ebenfalls nur subjectiv bedingten Variationen der Vergleichsempfindung in Beziehung gebracht. Bei unserem zuletzt beschriebenen Verfahren dagegen wird eine durch Variation der objectiven Reizverhältnisse abgestufte Scala von Normalempfindungen als Maß eingeführt, und da viel leichter eine Constanz der objectiven als eine solche der subjectiven Bedingungen einer Empfindung zu erzielen ist, so erklärt sich daraus schon zum Theil die scheinbar größere Schärfe der Unterschiedsempfindlichkeit im letzteren Fall. Freilich sollte man davon zunächst nur die Folge erwarten, dass nicht demselben Werth einer vom Vergleichsreiz nach bestimmter Expositionszeit ausgelösten Empfindung verschiedene Werthe der Normalempfindung als gleich

zugeordnet werden, während es noch immer möglich scheint, dass derselben Normalempfindung verschiedene Vergleichsempfindungen gleich gesetzt werden. Aber abgesehen davon, dass die öftere Anwendung eines exacten Maßstabes auch den Blick für die Differenzen des zu Messenden schärft, kommt die feine Abstufbarkeit der Normalempfindung auch in so fern für die Exactheit der Gleichungen in Betracht, als zu der bei bestimmter Expositionszeit des Vergleichsreizes vorhandenen Empfindung nur die Normalempfindung in Gleichheitsbeziehung gebracht wurde, die eben noch ihr gleich erschien, während eine geringe Verstärkung des Normalreizes das Gleichheitsverhältniss störte. Dieses Verfahren zeigte sich insofern besonders zweckmäßig bei Bestimmung der Expositionszeit des Reizes, nach welcher eine Lichtempfindung auf ihr Maximum ansteigt, als dabei der Normalreiz so groß gewählt wurde, dass der Vergleichsreiz nur in dem Augenblick ihm gleich erschien, wo er thatsächlich das Maximum seiner Empfindung erregt hatte, während eine weitere Steigerung der Intensität der Vergleichsempfindung oder Schwächung der Normalempfindung das Gleichheitsverhältniss wahrscheinlich nicht sofort gestört hätte.

Auf diese Weise gelang es, wie aus den folgenden Tabellen ersichtlich ist, wenn auch nicht einen, so doch eine in ziemlich enge Grenzen eingeschlossene Anzahl von Zeitwerthen für die Exposition des Vergleichsreizes zu bestimmen, bei denen die zugehörige Empfindung das Maximum ihrer Intensität erreichte. Zur specielleren Versuchstechnik ist aber zunächst noch Folgendes zu bemerken: Nachdem der Beobachter sich adaptirt hatte, wurde die Beleuchtungsstärke des Normalreizes durch die zugehörige Lichtquelle auf die neunfache Intensität des Vergleichsreizes eingestellt, wobei das Fenster F_2, betrachtet durch den Episkotister von 320° Sectorenbreite, dem Fenster F_1 gleich erscheinen musste. Diese Ausgangshelligkeit war nämlich als die günstigste ausprobirt worden. War die Einstellung einmal erfolgt, so wurde die den Normalreiz versorgende Lichtquelle völlig unverändert gelassen, so lange nicht eine der regelmäßig nach drei bis vier Versuchen stattfindenden Messungen eine Inconstanz derselben ergab, in welchem Fall natürlich eine Neueinstellung erfolgte und die vorausgehenden Versuche ausgeschaltet wurden. Diese Vorsichtsmaßregel war nöthig, weil man sich auf die Constanz des kleinen durch einen Accumulator versorgten Lämpchens nicht so verlassen konnte wie

auf diejenige der großen Glühlampe, welche durch den Hochstrom aus der städtischen Centrale gespeist wurde und den Vergleichsreiz lieferte. An einem und demselben Versuchstag machten sich übrigens nur selten derartige Intensitätsschwankungen geltend, während an verschiedenen Tagen eine jedesmalige Neueinstellung allerdings unerlässlich war.

Mit dem so bestimmten Normal- und Vergleichsreiz wurde nun zunächst in der oben beschriebenen Weise eine Reihe von Versuchen ausgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle I zusammengefasst sind. Beobachter war Herr Dr. Wirth, der, seit mehreren Semestern mit optischen Untersuchungen beschäftigt, in der Vergleichung von Helligkeiten bei festgehaltener Fixation einen Grad von Uebung besitzt, der nicht sehr häufig zu finden, aber für derartige Untersuchungen unerlässlich ist. Derselbe beobachtete mit dem linken Auge, während er das rechte durch eine Blende verdeckt hatte. Sein Kopf ruhte während der Fixation auf einer Kinnstütze. Auch sonst wurden natürlich alle die früher beschriebenen Vorsichtsmaßregeln beobachtet.

Die nachstehende Tabelle I enthält nun in ihrer ersten Columne Variationen des Verhältnisses der Helligkeiten von Vergleichsreiz und Normalreiz, welche durch verschiedene Grade der Verdunklung des Normalreizes mittelst wechselnder Sectorenbreite des Episkotisters in der früher beschriebenen Weise erzielt wurden. Die zweite Columne gibt die Expositionszeiten des Vergleichsreizes, in ansteigender Reihe geordnet, wieder, bei denen die Intensität der betreffenden Empfindung zu bestimmen versucht wurde. Das Resultat dieser Bestimmung findet sich in der vierten Columne. Diese enthält das Urtheil des Beobachters darüber, ob bei dem objectiven Helligkeitsverhältniss der beiden Reize, wie es in der ersten Columne ausgedrückt ist, der Vergleichsreiz nach der Expositionsdauer, welche die zweite Columne angibt, dem Normalreiz gleich, oder ob er heller oder dunkler als letzterer erscheint, und sie registrirt zugleich die Zahl der Beobachtungen bezw. die Zahl der Urtheile, die jedes Mal in dem einen oder anderen Sinn abgegeben wurden. In der dritten Columne endlich sind die jeweiligen Expositionsdauern des Normalreizes wiedergegeben, die eigentlich stets dieselben sein sollten und nur in Folge der nicht immer gleichen Umlaufsgeschwindigkeit des die Expositionszeiten bestimmenden Radcylinders eine gewisse Variation aufweisen. Diese $^1/_5$ Secunde nicht übersteigende Variation kommt übrigens für die

Intensität der Normalempfindung bei der Langsamkeit der Erregungsabnahme nach längerer Reizeinwirkung kaum in Betracht. Wo in mehreren Versuchen nur die Expositionszeit des Normalreizes variirt, mag es daher auch genügen, wenn wir das Mittel derselben und dazu die mittlere Variation angeben.

Die auf einander folgenden Zahlen in den Verticalcolumnen aller folgenden Tabellen entsprechen übrigens, wie hier ein für allemal bemerkt sein mag, nicht den Ergebnissen auf einander folgender Versuche. Es wurden vielmehr in verschiedenen Versuchsreihen die Expositionszeiten des Vergleichsreizes in verschiedenem Sinn (nicht bloß in dem eines Größenwachsthums) variirt, und der bei einer bestimmten Expositionszeit vorhandene Helligkeitswerth wurde für eine Reihe von Expositionszeiten an verschiedenen Tagen nachgeprüft.

Tabelle I[1]).

Helligkeitsverhältniss Vergleichsreiz : Normalreiz	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile Vergleichsreiz : Normalreiz dunkler	gleich	heller
4 : 27	178 σ	1,84 Sec.	1	—	—
1 : 3	178 »	1,84 »	1	—	—
6 : 17	178 »	1,84 »	—	—	1
4 : 23	186 »	1,66 »	1	—	—
4 : 21	186 »	1,66 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	—	3	—
1 : 8	206 »	1,84 »	1	—	—
2 : 15	206 »	1,84 »	1	—	—
1 : 3	206 »	1,84 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	—	—	2
4 : 27	213 »	1,66 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	3	—	—
4 : 21	213 »	1,66 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	—	3	—
4 : 27	239 »	1,66 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	5	—	—
2 : 9	251 »	1,74 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	—	2	1
4 : 27	266 »	1,66 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	—	6	—
4 : 15	279 »	1,74 »	—	—	1
1 : 4	279 »	1,74 »	—	—	1
4 : 27	295 »	1,75 » (M. V. 9$^{\sigma}$)	8	—	—
4 : 27	312 »	1,74 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	4	—	—
4 : 27	320 »	1,66 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	2	—	—

[1]) Die Expositionszeit des Vergleichsreizes und die mittlere Variation der Einwirkungsdauer des Normalreizes wird in allen folgenden Tabellen in Tausendtheilen einer Secunde ($^{\sigma}$) angegeben.

In dieser Tabelle ist das kleinste Verhältniss zwischen der Helligkeit des Vergleichsreizes und des Normalreizes, bei dem noch ein Gleichheitsurtheil vorkommt, das Verhältniss 4 : 27. Bei diesem Verhältniss findet jedoch subjective Gleichheit zwischen der Vergleichsempfindung und der Normalempfindung nur bei einer ganz bestimmten Expositionsdauer des Vergleichsreizes, bei einer solchen nämlich von 0,266 Secunden statt. Bei geringerer, ebenso wie bei größerer Einwirkungszeit erscheint der Vergleichsreiz dunkler als der Normalreiz. Wir haben demnach 0,266 Secunden als die Zeit anzusehen, welche ein farbloser Lichtreiz von der Intensität unseres Vergleichsreizes nach vorhergegangener Dunkeladaptation des empfindenden Subjects einwirken muss, damit die Empfindung ihr Intensitätsmaximum erreicht.

B. Farbige Lichtreize.

Wenn wir nun weiterhin einige durch gleich intensive farbige Lichtreize hervorgerufene Empfindungen in derselben Weise zu untersuchen bestrebt waren, so konnten wir unter der Voraussetzung, dass bei gleicher Intensität des Reizes auch das Maximum der Empfindung die gleiche Intensität besitzen werde wie das der untersuchten Weißempfindung, unser Verfahren in so fern vereinfachen, als wir das zur Eruirung des Maximums günstigste Helligkeitsverhältniss von Vergleichsreiz und Normalreiz ein für allemal beibehielten und nur die Expositionszeit des Vergleichsreizes so lange variirten, bis er dem Normalreiz gleich erschien. In der That zeigte sich, wie aus den folgenden Tabellen hervorgeht, dass für die untersuchten Farbenempfindungen bei dem erwähnten objectiven Helligkeitsverhältniss nur eine äußerst geringe Variationsbreite der Expositionszeiten des Reizes besteht, innerhalb deren die Empfindung die Intensität der Normalempfindung eben erreicht. Als farbige Lichtreize von einer für die vorliegende Untersuchung hinreichenden Homogeneität dienten Combinationen von Gelatineplättchen, wie sie zuerst Kirschmann für derartige Zwecke eingeführt hat[1]). Dieselben lieferten mir ein Roth von der Wellenlänge 700—610 $\mu\mu$, ein Grün von der Wellenlänge 510—486 $\mu\mu$ und ein Blau von der Wellenlänge 476—440 $\mu\mu$. Gelb ließ sich, wie ebenfalls schon Kirschmann hervorgehoben und Hell-

[1]) Kirschmann, Philos. Studien, Bd. VI, S. 543.

pach bestätigt hat, durch eine Gelatinecombination nicht rein genug herstellen. Hellpach benutzte daher zur Gewinnung eines spektralreinen Gelb den Lippich'schen Strahlenfilter, eine Combination zweier Glasgefäße mit parallelen, 9 und 1 cm abstehenden Längswänden, von denen das erstere mit einer Kaliumdichromatlösung, das letztere mit einer durch Reduction aus gelbem Uranylsulfat gewonnenen 5%igen Lösung von tiefgrünem Uranosulfat gefüllt war[1]). Ich erreichte dasselbe, indem ich das mit Kaliumdichromat gefüllte Gefäß von 9 cm Breite mit einem 5 cm breiten Glastrog voll Nickelsulfatlösung combinirte. Die beschriebenen »Strahlenfilter« wurden nun vor den Spalt gebracht, welchen die den Vergleichsreiz erleuchtenden Lichtstrahlen zu passiren hatten, bevor sie durch den Ausschnitt des Radcylinders weiter gehen konnten. Die Breite des Spaltes wurde dabei zur Regulirung der Helligkeit etwas variirt und eine Sammellinse, welche das Licht der Glühlampe auf den Spalt concentrirte, diente dazu, die Intensität der farbigen Lichtreize der des früher benutzten farblosen gleich zu machen, ohne dass der Spalt allzusehr verbreitert werden musste. Die Angleichung aller nach einander benutzten Vergleichsreize geschah mit Hülfe des constant erhaltenen Normalreizes. Dieser letztere blieb stets farblos. Da nämlich die hier benutzten farbigen Vergleichsreize bei ihrer geringen Intensität und bei der Dunkeladaptation des Beobachters keine ausgesprochenen Farbenempfindungen erregten, so bereitete die Helligkeitsvergleichung zwischen dem farbigen Vergleichsreiz und dem farblosen Normalreiz nicht die Schwierigkeiten, welche der Helligkeitsvergleichung zwischen einer gesättigten Farbe und dem weißen Licht anhaften. Nur die von rothem und blauem Licht ausgelösten Empfindungen enthielten bei den in Rede stehenden Versuchen überhaupt einen leichten Farbenton, die übrigen waren von reinen Helligkeitsempfindungen kaum zu unterscheiden, und die Vergleichung vollzog sich in allen Fällen ohne Schwierigkeit.

Die folgenden Tabellen II—VII enthalten die Ergebnisse der Beobachtungen von Dr. W. In Tabelle VIII und IX gebe ich die Resultate einiger Versuche wieder, bei denen ich selbst beobachtete, während Herr Dr. Wirth die Freundlichkeit hatte, die Versuchs-

---

[1]) Hellpach, Philos. Studien, Bd. XV, S. 524.

bedingungungen so zu reguliren, dass ich ebenso unwissentlich mein Urtheil abgeben konnte wie er in den vorausgehenden Versuchen. Bei den in Tabellen II—V zusammengefassten Untersuchungen war der Vergleichsreiz der Reihe nach roth, blau, grün und gelb. Tabelle VI enthält Controllversuche zu den Ergebnissen der Tabelle IV. In den Beobachtungen der Tabelle VII war der Vergleichsreiz nochmals farblos. Dieselben wurden nach denen der Tabelle III angestellt und sollten als Controlle dafür dienen, dass die objectiven Helligkeitsverhältnisse keine Verschiebung erlitten hätten. Die Controllversuche endlich der Tabellen VIII und IX beziehen sich auf das Ansteigen der durch weißes und gelbes Licht hervorgerufenen Empfindungen. Die Anordnung jeder einzelnen Tabelle entspricht völlig derjenigen von Tabelle I.

Tabelle II.

Vergleichsreiz: Roth. Beobachter: Dr. W.

Helligkeitsverhältniss von Vergleichsreiz und Normalreiz	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 27	167 σ	1,74 Sec.	1	—	—
4 : 27	195 »	1,74 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 27	228 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	251 »	1,74 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 27	307 »	1,74 » (M. V. 0σ)	3	—	—
4 : 27	335 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	391 »	1,74 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 27	418 »	1,75 » (M. V. 1σ)	2	—	—
4 : 27	451 »	1,76 »	1(?)	—	—
4 : 27	479 »	1,76 » (M. V. 0σ)	3	—	—
4 : 27	509 »	1,76 »	1	—	—
4 : 27	529 »	1,74 » (M. V. 0σ)	1	3	—
4 : 27	554 »	1,74 »	—	1	—
4 : 27	580 »	1,74 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 27	613 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	642 »	1,74 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 27	669 »	1,74 »	1	—	—

Aus dieser Tabelle ergibt sich, dass die Vergleichsempfindung bei einer Expositionsdauer des Vergleichsreizes von 0,529—0,554 Secunden der Normalempfindung gleich ist, während sie bei jeder anderen Einwirkungszeit des Reizes von der Normalempfindung an Intensität übertroffen wird, dass sie also nach etwa 0,541 Secunden Reizdauer ihr Intensitätsmaximum erreicht.

Tabelle III.

Vergleichsreiz: Blau. Beobachter: Dr. W.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 27	167 σ	1,74 Sec.	1	—	—
4 : 27	195 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	251 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	266 »	1,66 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 27	293 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	319 »	1,66 »	—	1(?)	—
4 : 27	335 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	365 »	1,75 » (M. V. 1σ)	2	—	—
4 : 27	396 »	1,76 »	1	—	—
4 : 27	418 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	449 »	1,70 » (M. V. 4σ)	2	—	—
4 : 27	480 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	532 »	1,75 » (M. V. 1σ)	—	2	—
4 : 27	554 »	1,74 »	—	1	—
4 : 27	580 »	1,74 » (M. V. 0σ)	2	2	—
4 : 27	613 »	1,74 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 27	640 »	1,70 » (M. V. 4σ)	2	—	—
4 : 27	707 »	1,76 » (M. V. 0σ)	2	—	—

Aus dieser Tabelle III geht hervor, dass die durch den blauen Lichtreiz ausgelöste Vergleichsempfindung ihr Maximum nach einer Einwirkungsdauer des Reizes von etwa 0,532—0,554 oder im Mittel von 0,543 Secunden erreicht.

Tabelle IV.

Vergleichsreiz: Grün. Beobachter: Dr. W.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 27	160 σ	1,66 Sec.	1	—	—
4 : 27	178 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	213 »	1,66 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 27	236 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	266 »	1,66 » (M. V. 0σ)	2	1(?)	—
4 : 27	295 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	319 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	354 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	373 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	399 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	426 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	447 »	1,75 » (M. V. 9σ)	2	—	—
4 : 27	476 »	1,75 » (M. V. 9σ)	2	—	—
4 : 27	502 »	1,75 » (M. V. 9σ)	2	—	—
4 : 27	531 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	556 »	1,75 » (M. V. 9σ)	1	1	—
4 : 27	559 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	584 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	612 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	638 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	666 »	1,66 » (M. V. 0σ)	1	1	—
4 : 27	691 »	1,66 » (M. V. 0σ)	—	2	—
4 : 27	721 »	1,66 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 27	744 »	1,66 »	1	—	—

Diese Tabelle IV besagt, dass die durch grünes Licht ausgelöste Vergleichsempfindung ihr Maximum nach einer Expositionszeit des Reizes von etwa 0,691 Secunde erreicht.

Tabelle V. Vergleichsreiz: Gelb. Beobachter: Dr. W.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 27	266 σ	1,84 Sec. (M. V. 0^{σ})	2	—	—
4 : 27	295 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	324 »	1,84 » (M. V. 0^{σ})	2	—	—
4 : 27	354 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	383 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	413 »	1,84 » (M. V. 0^{σ})	2	—	—
4 : 27	442 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	472 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	501 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	531 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	559 »	1,84 »	—	1(?)	—
4 : 27	587 »	1,84 » (M. V. 0^{σ})	—	4	—
4 : 27	613 »	1,84 » (M. V. 0^{σ})	3	—	—
4 : 27	648 »	1,84 » (M. V. 0^{σ})	2	—	—
4 : 27	677 »	1,84 » (M. V. 0^{σ})	2	—	—
4 : 27	707 »	1,84 » (M. V. 0^{σ})	3	—	—
4 : 27	738 »	1,84 »	1	—	—

Aus dieser Tabelle V entnehmen wir, dass die durch gelbes Licht ausgelöste Empfindung nach einer Einwirkung des Reizes von 0,559 bis 0,587 Sec. oder von etwa 0,573 Sec. ihr Maximum erreicht.

Tabelle VI. Vergleichsreiz: Grün. Beobachter: Dr. W.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 27	160 σ	1,66 Sec.	1	—	—
4 : 27	195 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	213 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	266 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	319 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	418 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	452 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	480 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	529 »	1,74 » (M. V. 0^{σ})	—	3	—
4 : 27	553 »	1,66 »	—	1	—
4 : 27	638 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	666 »	1,66 » (M. V. 0^{σ})	2	—	—

Diese Tabelle VI ergibt im Widerspruch zu Tabelle IV das Resultat, dass die durch grünes Licht ausgelöste Empfindung zwischen 0,529 und 0,553, also etwa bei 0,541 Secunden Expositionszeit des Reizes ihr Maximum erreicht.

Tabelle VII.

Vergleichsreiz: Weiß. Beobachter: Dr. W.

Objectives Helligkeitsverhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 27	178 σ	1,84 Sec.	1	—	—
4 : 27	206 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	228 »	1,74 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 27	236 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	251 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	266 »	1,84 » (M. V. 0σ)	—	2	—
4 : 27	279 »	1,74 » (M. V. 0σ)	—	4	—
4 : 27	295 »	1,84 » (M. V. 0σ)	1	1	—
4 : 27	324 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	354 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	383 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	418 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	444 »	1,79 » (M. V. 5σ)	2	—	—
4 : 27	473 »	1,79 » (M. V. 5σ)	2	—	—
4 : 27	501 »	1,84 »	1	—	—
4 : 27	529 »	1,74 » (M. V. 0σ)	1	1(?)	—
4 : 27	559 »	1,84 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 27	613 »	1,84 » (M. V. 0σ)	3	—	—
4 : 27	648 »	1,84 »	1	—	—

Diese Tabelle VII lehrt, in guter Uebereinstimmung mit Tabelle I, dass die durch gemischtes Licht hervorgerufene Weißempfindung ihr Maximum erreicht, wenn der Reiz 0,266—0,279 Secunden oder im Mittel 0,272 Secunden einwirkt.

Tabelle VIII. Vergleichsreiz: Weiß. Beobachter: Verfasser.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 27	167 σ	1,74 Sec.	1	—	—
4 : 27	228 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	251 »	1,74 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	2	—	—
4 : 27	266 »	1,66 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	—	3	—
4 : 27	279 »	1,74 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	1	1	—
4 : 27	293 »	1,66 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	2	—	—
4 : 27	335 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	480 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	529 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	580 »	1,74 »	1	—	—

Nach dieser Tabelle VIII erlangt die durch weißes Licht erregte Empfindung ihr Maximum bei einer Expositionszeit des Reizes von etwa 0,266 Secunden.

Tabelle IX. Vergleichsreiz: Gelb. Beobachter: Verfasser.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 27	228 σ	1,74 Sec.	1	—	—
4 : 27	266 »	1,66 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	2	—	—
4 : 27	279 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	391 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	452 »	1,66 »	1	—	—
4 : 27	480 »	1,66 »	1 (?)	—	—
4 : 27	529 »	1,74 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	—	2	—
4 : 27	553 »	1,70 » (M. V. 4$^{\sigma}$)	—	2	—
4 : 27	582 »	1,70 » (M. V. 4$^{\sigma}$)	2	—	—
4 : 27	642 »	1,74 »	1	—	—
4 : 27	669 »	1,74 »	1	—	—

Diese Tabelle IX besagt, dass die durch gelbes Licht hervorgerufene Empfindung nach 0,529—0,553 Secunden oder im Mittel nach 0,541 Secunden Expositionsdauer des Reizes ihr Intensitätsmaximum erreicht.

Vergleichen wir nun die Ergebnisse der einzelnen Tabellen unter einander, so bemerken wir zunächst einen bedeutenden Unterschied zwischen den Zeiten, während deren gemischtes und homogenes Licht einwirken muss, um die zugehörige Empfindung ihre Maximalintensität erreichen zu lassen. Dieser Unterschied ist um so merkwürdiger, als, wie bereits erwähnt, die untersuchten Farbenempfindungen sich von reinen Helligkeitsempfindungen in Folge der bekannten Eigenthümlichkeit des Dunkelspektrums nur sehr wenig unterschieden. Trotz dieser phänomenalen Aehnlichkeit der Empfindungen riefen rothes, gelbes und blaues Licht erst nach etwa doppelt so langer Einwirkung das Maximum der Empfindung hervor wie weißes Licht, und Grün würde nach Tabelle IV für denselben Effect eine noch längere Expositionsdauer nöthig haben. Indessen haben wir mehrfachen Grund, diesem letzteren Resultat nicht völlig zu trauen.

Es tritt nämlich als zweites Hauptergebniss aus den Tabellen II, III, V und IX eine ziemlich gute Uebereinstimmung der durch rothes, blaues und gelbes Licht erregten Empfindungen bezüglich der zur Erregung der Maximalempfindung nöthigen Reizeinwirkungsdauer hervor, indem diese Zeit für die verschiedenen Farben nur zwischen 541 und 573$^{\sigma}$ variirt, also eine größte Abweichung von nur 32$^{\sigma}$ aufweist. Diese Uebereinstimmung reicht wohl hin, den Satz zu rechtfertigen, dass die betreffenden Empfindungen bei ungefähr gleich langer Reizeinwirkung ihr Intensitätsmaximum erreichen. Dagegen würde nach Tabelle IV die durch grünes Licht erregte Empfindung ein ganz abweichendes Verhalten zeigen, welches durch die bisher bekannten oder auch hypothetisch angenommenen Beziehungen der Farben- und Helligkeitsempfindungen keinerlei Erklärung findet. Muss schon dieser Umstand ein gewisses Misstrauen hervorrufen, so findet dasselbe weitere Nahrung, wenn wir Tabelle IV selbst näher betrachten. Da zeigt sich nämlich, dass in der Zone, wo Tabelle II, III, V und IX ein Ueberwiegen der Gleichheitsurtheile aufweisen, doch auch ein Gleichheitsurtheil wenigstens vorkommt. Endlich ergibt auch Tabelle VI, welche die Ergebnisse von Controllversuchen mit grünem Vergleichsreiz enthält, gute Uebereinstimmung der durch grünes mit den durch anderes homogenes Licht hervorgerufenen Empfindungen bezüglich der zur Erreichung der Maximalintensität nöthigen Reizdauer. Freilich gibt uns Tabelle VI nicht das Recht,

Tabelle IV einfach zu eliminiren. Aber wir dürfen die hier aufgeworfene Frage vorläufig als eine offene betrachten und ihre Beantwortung von dem Ausfall weiterer Versuche abhängig machen, die, unter etwas veränderten Bedingungen angestellt, mit den nämlichen Problemen sich beschäftigten, und deren Verlauf und Ergebniss im Folgenden seine Darstellung finden soll.

II. Versuche bei Helladaptation.

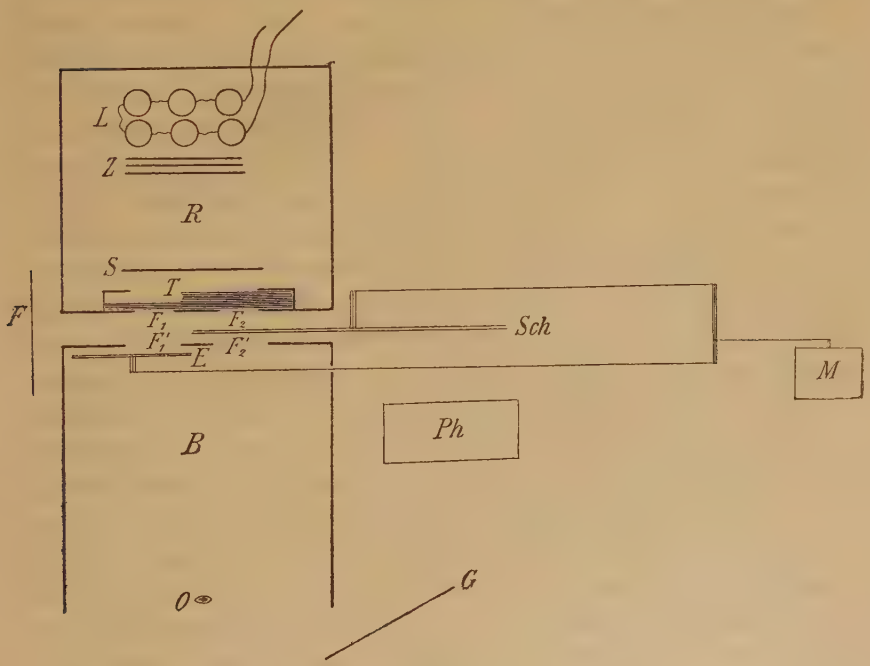
Eine neue Versuchsanordnung.

Die neue Versuchsanordnung, mit der ich hauptsächlich das Anklingen der Lichtempfindungen bei vorausgehender Helladaptation untersuchen wollte, richtete ich so ein, dass sie auch zur Ausführung gelegentlicher Versuche unter völliger Dunkeladaptation geeignet war, und gewann auf diese Weise Resultate, die im Verein mit den bisher besprochenen und den noch zu besprechenden Ergebnissen nicht nur eine Bestätigung bereits mitgetheilter, sondern auch einen Hinweis auf neue Gesetzmäßigkeiten in sich schließen. Im Princip schloss sich diese neue Versuchsanordnung vollkommen an die zuletzt beschriebene an. Nur einen Vortheil der letzteren musste sie preisgeben, indem die momentane Erleuchtung der ganzen als Beobachtungsobjecte dienenden Felder sich im hellen Zimmer nicht durchführen ließ. Dieselbe lässt sich unter den gegebenen Bedingungen, wenn die Dauer des Lichtreizes durch den Ausschnitt eines an demselben vorbei bewegten, ihn im übrigen verdunkelnden Schirmes begrenzt wird, nur dadurch erreichen, dass man der Lichtquelle die Gestalt eines sehr schmalen Spaltes gibt und zwischen ihr und dem vom Beobachter betrachteten Fenster den Schirmausschnitt so vorbeiführt, dass die Ränder desselben den ganzen Spalt in sehr kleiner Zeit ab- und zudecken. Dann wird die als Lichtreiz dienende Fläche während der gewünschten Expositionszeit in voller Ausdehnung gleichmäßig beleuchtet. Die von einem solchen schmalen Spalt ausgesandte Lichtmenge erwies sich aber, da mir eine intensivere Lichtquelle als elektrische oder Gasglühlampen nicht zu Gebote stand, als zu gering, um im hellen Zimmer eine selbst ganz nahe davor befindliche Fläche von Transparentpapier hinreichend zu erleuchten, besonders wenn

man noch lichtabsorbirende Substanzen, wie bei unseren Versuchen mit homogenem Licht, in den Weg der Strahlen bringen musste. Ich ließ deshalb den die Einwirkungszeit des Vergleichsreizes bestimmenden Ausschnitt nicht zwischen Lichtquelle und Lichtreiz, sondern zwischen dem letzteren und dem Auge des Beobachters sich bewegen, während die Einwirkung der Lichtquelle auf den Lichtreiz ununterbrochen fortdauerte. Dadurch erreichte ich, dass der letztere vom ersten Augenblick der Exposition an, wenn auch nicht in voller Flächenausdehnung, so doch in voller Helligkeit beleuchtet war. Da die volle Flächenausdehnung des hier in Betracht kommenden Feldes etwa 5,3 cm^2 betrug, und der Rand des vorbeigleitenden Schirmausschnitts bei einer mittleren Geschwindigkeit von 128 cm sec^{-1} zu einem Weg von 5 cm etwa 0,04 Secunden brauchte, so war diese Zeit von 0,04 Secunden nöthig, damit der Vergleichsreiz auch in voller Ausdehnung beleuchtet erschien. Dieselbe ist gegenüber den Zeiten, während welcher der Lichtreiz überhaupt einwirkte, immer noch sehr klein, und besser als alle theoretischen Discussionen werden die Versuchsergebnisse selbst zeigen, dass sie einen wesentlich verändernden Einfluss auf den Verlauf des Ansteigens der Lichtempfindungen nicht geübt haben kann.

In enger Beziehung zu dem bisher besprochenen Nachtheil steht übrigens ein großer Vortheil der neuen Versuchsanordnung, welcher gegeben ist in der eine beständige Controlle ersparenden, objectiv garantirten Constanz des Intensitätsverhältnisses zwischen dem Vergleichsreiz und dem auch bei diesen Versuchen wieder durch längere Expositionszeit und größere Helligkeit ausgezeichneten Normalreiz, sowie in der Möglichkeit einer bequemen Variation der absoluten Intensität beider Reize unter Beibehaltung ihres Intensitätsverhältnisses. Dies wurde dadurch erreicht, dass beide Reize von derselben Lichtquelle versorgt wurden. Dieselbe bestand in einer Batterie von elektrischen Glühlampen, welche in einem Kasten aus schwarzer Pappe eingeschlossen war. In Figur 2, welche die Anordnung im Grundriss wiedergibt, bedeutet *R* den Kasten, den wir im Folgenden kurz als Lichtkasten bezeichnen wollen. *L* stellt die Glühlampenbatterie dar, in welche 1 bis 6 Lampen eingeschaltet werden konnten. Vor diesen Lampen befand sich bei den Versuchen mit gemischtem Licht ein Rahmen, geeignet, 1 bis 3 Mattglasscheiben (*Z*) aufzu-

nehmen, durch welche das Licht gleichmäßig zerstreut wurde, bevor es die eigentlichen Beobachtungsobjecte versorgte. Diese bestanden zunächst lediglich in Schichten von Transparentpapier (*T*), vor welchen zumeist, um den Farbencharakter des Lichtes zu ändern, noch lichtabsorbirende Substanzen (*S*) in den Weg der Strahlen gebracht wurden. Der Intensitätsunterschied von Normalreiz und Vergleichsreiz wurde durch verschiedene Dicke jener Schichten von

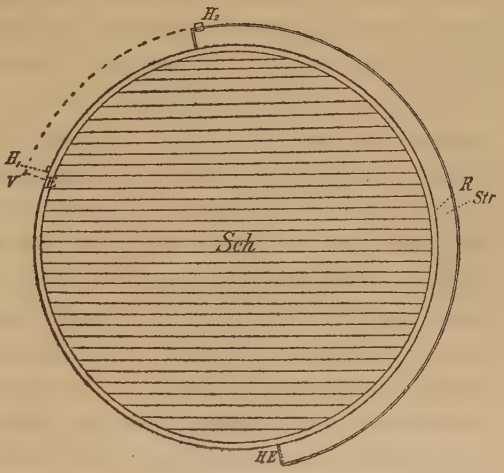


Figur 2.

Transparentpapier bestimmt, deren gewünschtes Verhältniss durch Ausprobiren gefunden und dann für jede Versuchsreihe constant gehalten wurde. Das Helligkeitsverhältniss der Reize blieb dann dasselbe, welche Veränderungen auch mit der Intensität der Lichtquelle vorgenommen wurden. Vergleichsreiz und Normalreiz wurden endlich für den außerhalb des Lichtkastens befindlichen Beobachter sichtbar gemacht durch zwei in der Wand dieses Kastens angebrachte Fenster (F_2 und F_1), welche 1 cm von einander entfernt und, wie bereits erwähnt, 3,5 cm² groß waren.

Nun galt es ganz besonders, da die Versuche im hellen Raum angestellt werden sollten, zu verhüten, dass außer dem von den Transparentpapierschichten durchgelassenen Licht der Glühlampenbatterie während der Versuche anderes, schädliches Licht auf die Netzhautstellen im Auge des Beobachters fiel, auf denen sich Normalreiz und Vergleichsreiz abbildeten. Zu diesem Zweck musste der Beobachter, dessen Kopf beim Beobachten wieder auf einer Kinnstütze ruhte [seine Position ist in der Figur durch das Auge (O) angedeutet], während jedes Versuchs in einen zweiten schwarzen Kasten (B) blicken, der mit seiner einen Wand nur wenige Centimeter von dem Lichtkasten entfernt war und weiterhin kurzweg als Beobachtungskasten bezeichnet werden soll. In seiner dem Lichtkasten gegenüberliegenden Wand befanden sich zwei Fenster (F'_1 und F'_2), durch welche gerade die beiden Lichtreize in voller Ausdehnung gesehen werden konnten. Für gewöhnlich waren diese Fenster durch zwei schwarze Schieber verschlossen, die, an starken Spiralfedern aufgehängt, für die Dauer einer Exposition weggezogen und, wenn die Exposition beendet sein sollte, durch die Spannkraft der Spiralfedern wieder zurückgeschnellt wurden. Damit die Schieber möglichst ruckweise und doch nicht unnöthig weit zurückgezogen werden konnten, waren sie mit Schnüren versehen, welche über zwei am Fußboden befestigte Rollen zu einem Schlittenapparat liefen, mittelst dessen die gewünschte Bewegung in festen Grenzen bequem und rasch ausgeführt wurde. Für den Normalreiz schien es hinreichend, die Expositionszeit auf diese Weise nur durch Oeffnen und Schließen des entsprechenden Fensters (F'_1) im Beobachtungskasten zu begrenzen, da er wieder so lange exponirt wurde, dass kleine Schwankungen der Einwirkungszeit keine wesentliche Aenderung der Empfindungsintensität bewirken konnten. Der Vergleichsreiz dagegen wurde noch nicht sichtbar, wenn das ihm entsprechende Fenster (F'_2) auch geöffnet war, solange der seine Einwirkung abgrenzende Schirmausschnitt nicht zwischen ihm und dem Fenster sich befand. Dieser Ausschnitt befand sich bei der gegenwärtigen Versuchsanordnung nicht in einem Cylindermantel, sondern in der Peripherie einer schwarzen Scheibe (Sch) von 110 cm Durchmesser, die zwischen Lichtkasten und Beobachtungskasten um eine horizontale Axe rotirte, wobei ihr äußerster Rand über den Trennungsstreifen zwischen Normal-

reiz und Vergleichsreiz niemals hinausragte, so dass weder vom Vergleichsreiz außerhalb der gewünschten Expositionszeiten etwas sichtbar noch vom Normalreiz jemals etwas verdeckt wurde. Der Ausschnitt musste natürlich wieder in seiner Länge variirbar sein, was auf folgende Weise erreicht wurde und durch Figur 3 erläutert wird. Ueber den Rand der massiven, durch Schraffirung kenntlich gemachten Scheibe (*Sch*) ragte der aus zwei hinter einander befindlichen Blättern bestehende feste Randstreifen ($R + Str$) hinaus, aus dem ein halber Kreisring von etwa 4 cm Breite ausgeschnitten war. Ein anderer halber Kreisring von etwas größerer Breite aus möglichst steifem schwarzen Carton konnte nun zwischen den Blättern des festen Randstreifens so verschoben werden, dass zwischen seinem einen Ende *VE* und dem breiteren Theil des Randstreifens ein zwischen 0 und 180° beliebig variirbarer Ausschnitt von 4 cm Breite übrig blieb. Um den verschiebbaren halben Kreisring in seiner jeweiligen Lage zu fixiren, brauchte man ihn nur mit zwei Papierhaften (H_1 und H_2) zwischen den Blättern des festen Randstreifens festzuklemmen.



Figur 3.

An der rotirenden Scheibe war nun ähnlich wie bei den früheren Versuchen ein Klöppel angebracht, der, gegen eine Glocke schlagend, den Augenblick signalisirte, wo der hintere Rand des Scheibenausschnittes (*H E*, da die Scheibe sich im Sinne des Uhrzeigers bewegte) die untere Grenze des Vergleichsreizes dem Beobachter gerade verdeckte. Dieses Signal löste wie früher eine Reaction des Experimentators aus, wodurch die Schieber vor den Fenstern des Beobachtungskastens weggezogen bezw. zurückgeschnellt wurden.

Der Normalreiz war, wie bereits erwähnt, nicht nur durch längere, in allen Versuchen möglichst constant gehaltene Expositionszeit, sondern auch durch größere Intensität gegenüber dem Vergleichsreiz charakterisirt. Während nun aber das Intensitätsverhältniss von Vergleichsreiz und Normalreiz, wie es durch die verschieden dicken Schichten von Transparentpapier bedingt wurde, auf möglichste Constanz berechnet war, diente zu der wünschenswerthen Variation desselben wiederum ein vor dem Normalreiz rotirender Episkotister mit variabler Sectorenbreite. Dieser Episkotister (*E* in Fig. 2) befand sich vor dem linken Fenster (F'_1) des Beobachtungskastens und wurde durch denselben Elektromotor (*M*) in Umlauf versetzt, von welchem die rotirende Scheibe (*C*) getrieben wurde. Die Geschwindigkeit des Motors wurde dabei in entgegengesetztem Sinn verändert auf die Scheibe (*Sch*) und den Episkotister übertragen, indem erstere möglichst langsam, letzterer sehr schnell sich drehen sollte. Durch Anwendung mehrerer Rotationsapparate mit Rädern von verschiedenem Durchmesser ließ sich dies leicht erreichen. Die Größe der Verdunklung des Normalreizes konnte nun wieder aus der Sectorenbreite des Episkotisters berechnet werden, wenn man das Schwarz der Sectoren durch ein bestimmtes Helligkeitsmaß auszudrücken im stande war. Um dasselbe mit möglichster Annäherung gleich Null setzen zu dürfen, überzog ich Sectoren von sogenanntem Brettspan mit tiefschwarzem Lack. Dieser Lack kam in dem schwarzen Beobachtungskasten dem absoluten Schwarz sehr nahe.

In den dunklen Kasten, durch dessen Fenster die Lichtreize unter Abhaltung schädlichen Lichtes dargeboten wurden, durfte nun aber der Beobachter, da die Versuche bei Helladaptation stattfinden sollten, nur während der höchstens 10 Secunden langen Dauer jeder Beobachtung blicken. In der übrigen Zeit musste er seine Augen auf einer mehrere Quadratmeter großen, neben dem Beobachtungskasten aufgestellten, gleichmäßig grauen Wand (*G*) ruhen lassen. Um die Helligkeit dieser Wand an den verschieden hellen Versuchstagen constant zu erhalten, war noch eine besondere Einrichtung getroffen. Das Fenster (*F*) des Zimmers, in dem die Versuche angestellt wurden, war nämlich bis zu einer gewissen Höhe vollständig durch schwarzen Carton abgeblendet, so dass Licht nur durch seinen oberen Theil einfallen konnte. Die Menge dieses Lichtes wurde nun

weiter regulirt durch einen Rollvorhang aus schwarzem Tuch. Derselbe wurde stets so weit herabgelassen, dass auf einem in der Mitte des Zimmers aufgestellten, von rückwärts durch eine elektrische Glühlampe mit Ausschluss alles andern Lichtes beleuchteten Bunsenschen Photometer (*Ph*) der Fettfleck (ein runder Oelfleck von etwa 1 cm Durchmesser auf Transparentpapier) weder heller noch dunkler als seine Umgebung erschien. Die auf diese Weise bestimmte, auch an sonnigen Tagen im Zimmer herrschende Helligkeit entsprach der eines trüben Regentages, wie sie in Leipzig in den Nachmittagsstunden der Monate October bis Dezember, wo die meisten Versuche angestellt wurden, in einem etwa 4 m breiten und 10 m langen Zimmer durch ein nach Osten gerichtetes etwa 6 m^2 großes Fenster durchschnittlich erreicht werden konnte.

Der allgemeine Verlauf der mit der beschriebenen Versuchsanordnung angestellten Experimente war nun folgender. Ich untersuchte zunächst Lichtempfindungen, wie sie erregt wurden, wenn das Licht von vier Glühlampen durch drei Mattglasscheiben gleichmäßig zerstreut die Vergleichsreiz und Normalreiz darstellenden Transparentpapierschichten erleuchtete. Dabei zeigten die Lichtreize einen ausgesprochen rothgelben Farbenton. Die auf diese Weise gewonnenen Resultate[1]) veranlassten mich dann aber, farbloseres Licht zu benützen, welches ich dadurch gewann, dass ich zwischen die Mattglasscheiben und die Schichten von in diesem Falle etwas grünlich gefärbtem Transparentpapier einen 1 cm dicken, 10 cm breiten und 10 cm hohen Glastrog mit parallelen Wänden, gefüllt mit der hellblauen Lösung einer Anilinfarbe, brachte, wodurch die in dem Licht der Glühlampen überwiegenden rothen und gelben Strahlen stärker als die andern absorbirt und die Lichtreize mit einem farblosen, aus Strahlen aller möglichen Wellenlängen gleichmäßig gemischten Licht versorgt wurden. Die hierbei gefundenen Ergebnisse gaben Veranlassung, die Abhängigkeit der Reizzeit, nach welcher Lichtempfindungen das Maximum ihrer Intensität erreichen, von der Stärke der Lichtreize zu untersuchen. Es wurde deshalb unter Beibehaltung der Dicke der Transparentpapierschichten durch Vermehrung und Verminderung der Glühlampen, sowie durch Verminderung der Mattglasscheiben die

[1]) Dieselben haben in den folgenden Tabellen keine Aufnahme gefunden.

absolute Intensität der Lichtreize variirt. Diese Versuche schienen eine Unabhängigkeit der Zeit des Anklingens der Lichtempfindungen zu beweisen, besonders wenn man ihre Ergebnisse mit den Resultaten der früheren, in der Dunkelkammer angestellten Experimente verglich. Bei den weiteren Versuchen mit homogenem Licht bemühte ich mich deshalb von vornherein nicht, die Intensität der verwendeten Farben jener des weißen bezw. des gemischten gelblichen Lichtes absolut gleich zu machen, während ich immerhin durch Variation der Mattglasscheiben, der Dicke der Transparentpapierschichten und der Zahl der Glühlampen dafür sorgte, dass allzu große Helligkeitsdifferenzen zwischen den einzelnen Farben nicht vorkamen. So benutzte ich bei den Versuchen mit rothem Licht, welches ich durch dieselbe Combination von Gelatineplättchen wie früher gewann, sechs Glühlampen, eine Mattglasscheibe und dieselbe Dicke der Transparentpapierschichten wie bei den Versuchen mit weißem Licht. Bei der Untersuchung der Grünempfindung, zu deren Erregung ebenfalls die früher schon benutzte Combination von Gelatineplättchen Verwendung fand, musste auch die letzte Mattglasscheibe entfernt und die Dicke der Normalreiz und Vergleichsreiz darstellenden Transparentpapierschichten verringert werden. Ebenso bei den Versuchen mit blauem Licht. Dieses blaue Licht gewann ich, da Combinationen von Gelatineplättchen eine nicht genug gesättigte Farbe ergaben, sehr schön durch Verwendung von Kupferammoniak. Diese tiefblaue Flüssigkeit, welche durch Verbindung einer Kupfersulfatlösung mit Ammoniak gewonnen und durch Zusatz von Ammoncarbonat vor dem Entweichen von Ammoniak gesichert wird, lässt in einer 1 cm dicken Schicht, wie sie bei Benutzung des oben erwähnten Glastrogs sich ergibt, außer blauen nur noch violette Strahlen durch, welche letzteren durch ein Blättchen grüner Gelatine leicht zurückgehalten werden können. Durch Combination eines solchen grünen Gelatineblättchens mit der beschriebenen Kupferammoniaknormallösung gewann ich daher ein fast spektralreines Indigo von sehr schöner Sättigung. Gelbes Licht wurde wie bei den früheren Versuchen durch Verwendung einer Kaliumdichromat- und einer Nickelsulfatlösung gewonnen. Zu diesem Zweck wurden zwei Glaströge mit parallelen Wänden in den Weg der Lichtstrahlen gebracht. Der eine, zur Aufnahme der Kupferammoniaklösung bereits verwendete, enthielt die Nickelsulfatlösung, der andere, welcher ebenso

hoch und breit, aber doppelt so dick war, wurde mit der Lösung von Kaliumdichromat gefüllt. Bei Verwendung von 6 Glühlampen, deren Licht durch keine Mattglasscheibe gedämpft wurde, und von derselben Dicke der Transparentpapierschichten, wie sie bei den Versuchen mit blauem Licht benutzt worden war, ergab sich auf diese Weise ein gesättigtes Gelb jener mittleren Intensitätsstufe, welcher alle meine Farben angehörten.

Dadurch, dass auch bei den Farbenversuchen der Intensitätsunterschied der Reize durch verschiedene Dicke der Schichten aus weißem (bezw. grünlichem) Transparentpapier hergestellt wurde, ergab sich als Nebeneffect auch ein Sättigungsunterschied der Farbe des Normal- und des Vergleichsreizes, wobei die des letzteren die weniger gesättigte war. Diese ursprüngliche Sättigungsdifferenz erwies sich aber gerade als nützlich, indem der Farbenton des länger exponirten Normalreizes stets etwas verblasste und der des Vergleichsreizes während des Anklingens der Empfindung immer etwas zunahm, so dass es erreicht werden konnte, dass beide Reize in einem bestimmten Moment gleiche Helligkeit und Sättigung zu besitzen schienen. Zu diesem Zwecke musste bei blauem und gelbem Licht allerdings das Verhältniss der Dicke der Transparentpapierschichten anders gewählt werden als bei rothem und grünem.

Hierbei erwies sich wiederum der Episkotister, der zur Variation der Helligkeit des Normalreizes verwendet wurde, als sehr nützlich. Dieser Episkotister wurde wiederum wie bei den Versuchen in der Dunkelkammer zunächst so benützt, dass für eine bestimmte Sectorenbreite desselben ein entsprechendes Dickenverhältniss der Transparentpapierschichten gesucht wurde, so dass, wenn der Episkotister mit der betreffenden Sectorenbreite vor dem Normalreiz rotirte, die beiden Reize bei gleich langer Exposition keinen Helligkeitsunterschied aufwiesen. Dann wurde eine andere Sectorenbreite gesucht, bei welcher der Vergleichsreiz, wenn er gerade das Maximum seiner Erregung bewirkte, dem länger exponirten Normalreiz gleich erschien. Aus beiden Sectorenbreiten wurde dann die objective Helligkeitsdifferenz berechnet, die im letzteren Fall noch bestand. Bei den Versuchen mit blauem und gelbem Licht wurde dagegen für ein beliebiges, durch die Dicke der Transparentpapierschichten herbeigeführtes Intensitätsverhältniss zwischen Normalreiz und Vergleichs-

reiz, wie es für den Sättigungsausgleich sich am günstigsten erwies, zunächst eine Sectorenbreite des Episkotisters eingestellt, bei welcher die Maximalempfindung des Vergleichsreizes der Empfindung des Normalreizes gerade gleich erschien. Erst nachträglich wurde zur Bestimmung der in diesem Fall vorhandenen objectiven Helligkeitsdifferenz die Sectorenbreite des Episkotisters gesucht, bei welcher er den durch die verschiedene Dicke der Transparentpapierschichten bedingten, bei gleich langer Exposition zu Tage tretenden Unterschied der Intensität von Vergleichsreiz und Normalreiz gerade ausglich. Die Berechnung aus beiden Sectorenbreiten ergab nun für meine einzelnen Beobachter genau dasselbe objective Helligkeitsverhältniss, das auch bei den übrigen Versuchen unter Helladaptation im günstigsten Fall Gleichheit der Empfindungen zur Folge hatte.

Für die verschiedenen Beobachter war und blieb jenes Verhältniss bei aller sonstigen Uebereinstimmung ein verschiedenes oder vielmehr, zwei derselben, Herr Geiger und Herr Katzenellenbogen, die sich an den früheren Versuchen bei Dunkeladaptation noch nicht betheiligt hatten, fanden einen übereinstimmenden, in allen ihren Beobachtungen constant bleibenden Werth jenes Verhältnisses, der von dem Werth abwich, welchen Herr Dr. Wirth und ich selbst ebenfalls übereinstimmend constatirten. Mit einigen weiteren Beobachtern konnte ich keine brauchbaren Resultate erzielen, da ihre Urtheile unter den nämlichen Versuchsbedingungen allzu sehr der Constanz entbehrten.

Alle Beobachtungen wurden mit einem Auge ausgeführt, und zwar benutzten Herr Geiger und Herr Katzenellenbogen das rechte, Herr Dr. Wirth und ich selbst das linke Auge. Auf dem andern Auge trug der Beobachter während des Versuchs eine Blende, die aber während der Adaptationspausen entfernt wurde.

Jeder einzelne Versuch vollzog sich nun in folgender Weise. Auf ein vom Experimentator zugerufenes »Jetzt« wandte sich der Beobachter von der grauen Wand, auf die er bis dahin geblickt hatte, ab, stützte seinen Kopf auf die Kinnstütze und schob die Blende zurecht. Auf ein zwei bis drei Secunden später zugerufenes zweites Signal hin fasste er den zwischen den Fenstern des Beobachtungskastens angebrachten Fixationspunkt ins Auge. Weitere zwei bis drei Secunden später erschien der Normalreiz und entsprechende

Zeit darnach der Vergleichsreiz, bis dann beide gleichzeitig wieder verschwanden. In diesem Augenblick hatte der Beobachter sein Urtheil abzugeben, ob der Vergleichsreiz gleich, heller oder dunkler erscheine als der Normalreiz. Während das Urtheil notirt, Veränderungen des die Expositionszeit des Vergleichsreizes bestimmenden Ausschnitts der rotirenden Scheibe ohne Vorwissen des Beobachters vorgenommen und ab und zu auch Bestimmungen der Umdrehungszeit der Scheibe mittelst der Fünftelsecundenuhr ausgeführt wurden, adaptirte sich dann der Beobachter wieder an der grauen Wand.

Die Umdrehungszeit der rotirenden Scheibe blieb an jedem Versuchstag sehr constant. Wenn die ihr entsprechenden Expositionsdauern des Normalreizes trotzdem in den folgenden Tabellen wieder etwas verschiedene Werthe aufweisen, so hat dies seinen Grund darin, dass jede Versuchsreihe sich über mehrere Versuchstage erstreckte, wobei eine geringe Variation jener Umdrehungsgeschwindigkeit nicht zu vermeiden war. Jede Tabelle enthält die Versuchsergebnisse eines Beobachters, die er bei Beobachtung derselben Lichtreize unter denselben Versuchsbedingungen zu irgend einer Zeit gewann. Der Name des Beobachters ist jeder Tabelle beigefügt. Nicht aufgenommen sind Vorversuche zur Einübung und zur Bestimmung des Intensitätsverhältnisses von Vergleichsreiz und Normalreiz, bei welchem die Maximalempfindung des Vergleichsreizes der durch Ermüdung herabgesetzten Empfindung des Normalreizes gleich erschien, sowie Versuche, in welchen dem Beobachter oder dem Experimentator ein die Beobachtung möglicher Weise störender Umstand auffiel. In jeder Tabelle sind die aufeinander folgenden Zahlen der Verticalcolumnen wie früher nach der Größe der Expositionszeit des Vergleichsreizes geordnet. Auch die aufeinander folgenden Verticalcolumnen selbst entsprechen völlig denen der früher mitgetheilten Tabellen. Die Reihenfolge der einzelnen Tabellen endlich schließt sich derjenigen der Versuche an, wie sie auf Seite 247 ff. mitgetheilt ist.

1. Ergebnisse der Versuche mit weißem Licht.

Tabelle X. Beobachter: K.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
1 : 2	155 σ	3,05 Sec.	1	—	—
1 : 2	166 »	2,60 »	1	—	—
1 : 2	179 »	2,80 »	1	—	—
1 : 2	195 »	3,05 » (M. V. 0σ)	—	2(?)	—
1 : 2	200 »	2,60 »	—	1(?)	—
1 : 2	235 »	3,05 »	1	—	—
1 : 2	269 »	2,80 » (M. V. 0σ)	—	2	—
1 : 2	294 »	3,05 »	1	—	—
1 : 2	333 »	2,60 »	1	—	—
1 : 2	359 »	2,80 »	1	—	—
1 : 2	390 »	3,05 »	1	—	—
1 : 2	404 »	2,80 »	1	—	—
1 : 2	440 »	3,05 »	1	—	—
1 : 2	458 »	2,60 »	1	—	—
1 : 2	497 »	2,70 » (M. V. 10σ)	2	—	—
1 : 2	539 »	3,05 » (M. V. 0σ)	3	—	—
1 : 2	587 »	3,05 »	1	—	—

Diese Tabelle X lässt es zweifelhaft, ob nach einer Expositionszeit von 0,195—0,200 Secunden oder nach einer solchen von 0,269 Secunden weißes Licht das Maximum der Empfindung erregt.

Tabelle XI. Beobachter: G.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
1 : 2	144 σ	2,25 Sec.	1	—	—
1 : 2	167 »	2,20 » (M. V. 5σ)	4	—	—
1 : 2	215 »	2,25 » (M. V. 0σ)	—	2(?)	—
1 : 2	226 »	2,35 » (M. V. 0σ)	—	2(?)	—
1 : 2	253 »	2,25 »	—	1	—
1 : 2	277 »	2,15 » (M. V. 0σ)	—	2(?)	—
1 : 2	286 »	2,25 »	1	—	—
1 : 2	312 »	2,15 »	1	—	—
1 : 2	344 »	2,15 »	1	—	—

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
1 : 2	360 σ	2,25 Sec.	1	—	—
1 : 2	377 »	2,15 »	1	—	—
1 : 2	395 »	2,25 » (M. V. 0σ)	2	—	—
1 : 2	416 »	2,15 »	1	—	—
1 : 2	434 »	2,25 »	1	—	—
1 : 2	449 »	2,15 »	1	—	—
1 : 2	517 »	2,15 » (M. V. 0σ)	2	—	—
1 : 2	527 »	2,35 »	1	—	—
1 : 2	546 »	2,20 » (M. V. 5σ)	3	—	—
1 : 2	618 »	2,15 »	1	—	—

Diese Tabelle XI lehrt, dass bei einer Expositionszeit zwischen 0,215 und 0,277, wahrscheinlich bei einer solchen von 0,253 Secunden der angewandte Reiz das Maximum der Erregung hervorruft.

Tabelle XII. Beobachter: Dr. W.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
2 : 5	182 σ	2,84 Sec. (M. V. 4σ)	3	—	—
2 : 5	220 »	2,98 » (M. V. 18σ)	3	—	—
2 : 5	254 »	2,25 »	1	—	—
2 : 5	266 »	2,77 » (M. V. 3σ)	—	4	—
2 : 5	277 »	2,88 » (M. V. 0σ)	—	2	—
2 : 5	312 »	2,98 » (M. V. 18σ)	1	1	—
2 : 5	321 »	2,88 »	1	—	—
2 : 5	404 »	2,80 »	—	1(?)	—
2 : 5	449 »	2,80 »	1	—	—
2 : 5	487 »	2,75 »	1	—	—
2 : 5	529 »	2,75 » (M. V. 0σ)	2	1(?)	—
2 : 5	583 »	2,80 »	1	—	—
2 : 5	629 »	2,80 »	1	—	—
2 : 5	673 »	2,80 »	1	—	—

Aus dieser Tabelle XII entnehmen wir, dass unser Vergleichsreiz bei einer Einwirkungsdauer von 0,266—0,277, also etwa bei einer solchen von 0,271 Secunden die zugehörige Maximalempfindung erregt.

Tabelle XIII. Beobachter: Dr. W.

Lichtreize von geringerer Intensität.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
2 : 5	137 σ	2,15 Sec.	1	—	—
2 : 5	164 »	2,15 » (M. V. 0σ)	2	—	—
2 : 5	212 »	2,22 » (M. V. 7σ)	2	—	—
2 : 5	243 »	2,15 » (M. V. 0σ)	2	—	—
2 : 5	266 »	2,77 » (M. V. 2σ)	—	3	—
2 : 5	281 »	2,98 » (M. V. 18σ)	—	2	—
2 : 5	311 »	2,15 » (M. V. 0σ)	—	2	—
2 : 5	333 »	2,30 »	1	—	—
2 : 5	344 »	2,15 »	1	—	—
2 : 5	449 »	2,15 »	1	—	—
2 : 5	517 »	2,15 » (M. V. 0σ)	1	1(?)	—
2 : 5	529 »	2,80 » (M. V. 0σ)	1	1(?)	—
2 : 5	552 »	2,15 »	1	—	—
2 : 5	585 »	2,15 »	1	—	—
2 : 5	590 »	2,30 » (M. V. 0σ)	3	—	—

Diese Tabelle XIII lehrt, dass auch weißes Licht von geringerer Intensität als das in den vorausgehenden Versuchen verwendete bei ungefähr derselben Expositionszeit von 0,266—0,311 oder im Mittel von 0,288 Secunden das Maximum der Empfindung bewirkt.

2. Ergebnisse der Versuche mit (farbigem) homogenem Licht.

Tabelle XIV. Beobachter: G. Rothes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
1 : 2	150 σ	2,36 Sec.	1	—	—
1 : 2	182 »	2,38 » (M. V. 2σ)	2	—	—
1 : 2	226 »	2,36 »	1	—	—
1 : 2	267 »	2,38 » (M. V. 2σ)	2	1(?)	—
1 : 2	302 »	2,36 » (M. V. 0σ)	1	1(?)	—
1 : 2	344 »	2,38 » (M. V. 2σ)	2	—	—
1 : 2	381 »	2,38 » (M. V. 2σ)	1	1	—
1 : 2	418 »	2,36 » (M. V. 0σ)	3	—	—

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
1 : 2	458 σ	2,38 Sec. (M. V. 2σ)	2	—	—
1 : 2	492 »	2,36 »	1	—	—
1 : 2	500 »	2,40 »	—	2(?)	—
1 : 2	529 »	2,36 »	—	3	—
1 : 2	539 »	2,40 »	—	1(?)	—
1 : 2	567 »	2,36 »	1	—	—
1 : 2	577 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	611 »	2,38 » (M. V. 2σ)	2	—	—
1 : 2	692 »	2,40 »	1	—	—

Diese Tabelle XIV besagt, dass die Rothempfindung bei einer Expositionszeit des Reizes von 0,500—0,539, also etwa von 0,519 Secunden ihr Intensitätsmaximum erreicht.

Tabelle XV. Beobachter: Dr. W. Rothes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
2 : 5	128 σ	2,02 Sec. (M. V. 2σ)	2	—	—
2 : 5	156 »	2,05 » (M. V. 5σ)	2	—	—
2 : 5	194 »	2,04 »	1	—	—
2 : 5	230 »	2,04 »	1	—	—
2 : 5	261 »	2,02 » (M. V. 2σ)	3	—	—
2 : 5	291 »	2,00 »	1	—	—
2 : 5	326 »	2,04 »	1	—	—
2 : 5	357 »	2,04 »	1	—	—
2 : 5	395 »	2,04 »	1	—	—
2 : 5	418 »	2,00 »	2	—	—
2 : 5	491 »	2,04 » (M. V. 0σ)	1	1(?)	—
2 : 5	514 »	2,02 » (M. V. 2σ)	1	2	—
2 : 5	527 »	2,04 »	—	1	—
2 : 5	544 »	2,00 » (M. V. 0σ)	1	1	—
2 : 5	558 »	2,04 »	—	1	—
2 : 5	590 »	2,04 » (M. V. 0σ)	2	1	—
2 : 5	611 »	2,00 » (M. V. 0σ)	3	—	—
2 : 5	626 »	2,04 »	1	—	—
2 : 5	648 »	2,00 »	1	—	—
2 : 5	662 »	2,04 »	2	—	—
2 : 5	698 »	2,04 »	1	—	—

Aus dieser Tabelle XV entnehmen wir, dass die Rothempfindung bei einer Einwirkungsdauer des Reizes von 0,514—0,558, also im Mittel von 0,535 Secunden ihr Intensitätsmaximum erreicht.

Tabelle XVI.

Beobachter: Verfasser. Rothes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
2 : 5	150 σ	2,35 Sec.	1	—	—
2 : 5	180 »	2,35 »	1	—	—
2 : 5	220 »	2,30 » (M. V. 0σ)	2	—	—
2 : 5	256 »	2,28 » (M. V. 2σ)	2	—	—
2 : 5	264 »	2,35 »	1	—	—
2 : 5	295 »	2,30 »	1	—	—
2 : 5	302 »	2,35 »	1	—	—
2 : 5	327 »	2,25 »	1	—	—
2 : 5	372 »	2,32 » (M. V. 2σ)	3	—	—
2 : 5	413 »	2,35 » (M. V. 0σ)	1	1 (?)	—
2 : 5	434 »	2,25 »	1	—	—
2 : 5	469 »	2,25 »	1	—	—
2 : 5	490 »	2,35 »	1	—	—
2 : 5	516 »	2,30 » (M. V. 0σ)	1 (?)	1 (?)	—
2 : 5	527 »	2,35 » (M. V. 0σ)	—	2	—
2 : 5	541 »	2,25 » (M. V. 0σ)	—	2	—
2 : 5	553 »	2,30 »	—	1	—
2 : 5	565 »	2,35 »	—	1	—
2 : 5	603 »	2,30 » (M. V. 5σ)	2	—	—
2 : 5	626 »	2,30 »	1	—	—
2 : 5	640 »	2,35 » (M. V. 0σ)	2	—	—
2 : 5	716 »	2,35 » (M. V. 0σ)	2	—	—

Diese Tabelle XVI besagt, dass rothes Licht bei einer Expositionszeit von 0,526—0,565 oder im Mittel von 0,546 Secunden eine Empfindung von maximaler Intensität hervorruft.

Tabelle XVII. Beobachter: K. Grünes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint dunkler	gleich	heller
1 : 2	154 σ	2,40 Sec. (M. V. 0$^\sigma$)	2	1 (?)	—
1 : 2	184 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	230 »	2,40 » (M. V. 0$^\sigma$)	2	—	—
1 : 2	270 »	2,40 » (M. V. 0$^\sigma$)	3	1	—
1 : 2	308 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	347 »	2,40 » (M. V. 0$^\sigma$)	1	1 (?)	—
1 : 2	384 »	2,40 » (M. V. 0$^\sigma$)	2	—	—
1 : 2	422 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	462 »	2,40 » (M. V. 0$^\sigma$)	3	—	—
1 : 2	519 »	2,40 » (M. V. 0$^\sigma$)	—	3	—
1 : 2	539 »	2,40 » (M. V. 0$^\sigma$)	1	2	—
1 : 2	577 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	616 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	654 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	692 »	2,40 »	1	—	—

Aus dieser Tabelle XVII geht hervor, dass die Grünempfindung bei einer Expositionszeit des Reizes von etwa 0,519—0,539 oder im Mittel von 0,529 Secunden ihr Intensitätsmaximum besitzt.

Tabelle XVIII. Beobachter: G. Grünes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint dunkler	gleich	heller
1 : 2	154 σ	2,40 Sec.	1	—	—
1 : 2	184 »	2,40 » (M. V. 0$^\sigma$)	2	—	—
1 : 2	226 »	2,36 »	1	—	—
1 : 2	270 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	305 »	2,38 » (M. V. 2$^\sigma$)	2	1	—
1 : 2	347 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	422 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	455 »	2,36 »	1	—	—
1 : 2	500 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	519 »	2,38 » (M. V. 2$^\sigma$)	—	5	—
1 : 2	539 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	577 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	616 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	643 »	2,36 » (M. V. 0$^\sigma$)	2	—	—
1 : 2	692 »	2,40 »	1	—	—
1 : 2	731 »	2,40 »	1	—	—

Auf Grund dieser Tabelle XVIII haben wir das Maximum der Grünempfindung bei einer Expositionszeit des Reizes von etwa 0,519 Secunden zu suchen.

Tabelle XIX. Beobachter: Dr. W. Grünes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
2 : 5	150 σ	2,35 Sec.	1	—	—
2 : 5	182 »	2,37 » (M. V. 2σ)	2	—	—
2 : 5	225 »	2,35 »	1	—	—
2 : 5	270 »	2,40 » (M. V. 0σ)	1	1	—
2 : 5	308 »	2,40 » (M. V. 0σ)	1	1	—
2 : 5	343 »	2,37 » (M. V. 2σ)	2	—	—
2 : 5	422 »	2,40 »	—	1(?)	—
2 : 5	453 »	2,35 »	1	—	—
2 : 5	527 »	2,35 » (M. V. 0σ)	—	2	—
2 : 5	539 »	2,40 » (M. V. 0σ)	—	3	—
2 : 5	577 »	0,40 » (M. V. 0σ)	2	—	—
2 : 5	603 »	2,35 »	1	—	—
2 : 5	640 »	2,35 »	1	—	—
2 : 5	731 »	2,40 »	2	—	—

Aus dieser Tabelle XIX entnehmen wir, dass grünes Licht nach ungefähr 0,527—0,539 oder im Mittel nach 0,533 Secunden Expositionszeit das Maximum der Empfindung hervorruft.

Tabelle XX. Beobachter: Verfasser. Grünes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
2 : 5	156 σ	2,42 Sec. (M. V. 2σ)	2	—	—
2 : 5	184 »	2,40 » (M. V. 0σ)	2	—	—
2 : 5	232 »	2,42 » (M. V. 2σ)	1	1(?)	—
2 : 5	270 »	2,40 » (M. V. 0σ)	1	1	—
2 : 5	275 »	2,45 »	1	—	—
2 : 5	308 »	2,40 » (M. V. 0σ)	2	—	—
2 : 5	354 »	2,45 »	1	—	—
2 : 5	384 »	2,40 »	1	1(?)	—

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
2 : 5	422 σ	2,40 Sec.	1	—	—
2 : 5	462 »	2,40 »	1	—	—
2 : 5	511 »	2,45 »	—	1	—
2 : 5	523 »	2,40 » (M. V. 0σ)	—	3	—
2 : 5	527 »	2,45 » (M. V. 0σ)	—	2	—
2 : 5	550 »	2,45 »	1	—	—
2 : 5	577 »	2,40 »	1	—	—
2 : 5	589 »	2,45 »	—	1	—
2 : 5	616 »	2,40 »	1	—	—
2 : 5	654 »	2,40 »	1	—	—
2 : 5	692 »	2,40 »	—	1 (?)	—
2 : 5	706 »	2,45 »	1	—	—
2 : 5	746 »	2,45 »	1	—	—

Nach dieser Tabelle XX erreicht die Grünempfindung ihr Intensitätsmaximum nach ungefähr 0,511—0,527 oder nach etwa 0,519 Secunden dauernder Einwirkung des Reizes.

Tabelle XXI. Beobachter: G. Blaues Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
1 : 2	255 σ	2,65 Sec. (M. V. 0σ)	2	—	—
1 : 2	262 »	2,72 » (M. V. 2σ)	1	1 (?)	—
1 : 2	346 »	2,70 »	1	—	—
1 : 2	396 »	2,75 »	1	—	—
1 : 2	425 »	2,65 »	1	—	—
1 : 2	476 »	2,70 »	1	—	—
1 : 2	519 »	2,70 » (M. V. 0σ)	1	2	—
1 : 2	527 »	2,70 » (M. V. 5σ)	—	4	—
1 : 2	552 »	2,65 »	1	—	—
1 : 2	607 »	2,70 »	—	1	—
1 : 2	618 »	2,75 »	1	—	—
1 : 2	692 »	2,70 »	1	—	—
1 : 2	722 »	2,65 »	1	—	—

Diese Tabelle XXI rechtfertigt den Satz, dass blaues Licht nach einer Einwirkungsdauer von 0,519—0,527 oder von etwa 0,523 Secunden das Maximum der Empfindung hervorruft.

Tabelle XXII. Beobachter: Dr. W. Blaues Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
2 : 5	202 σ	2,62 Sec. (M. V. 2σ)	2	—	—
2 : 5	252 »	2,63 » (M. V. 2σ)	2	1	—
2 : 5	271 »	2,65 »	—	1(?)	—
2 : 5	297 »	2,65 »	1	—	—
2 : 5	375 »	2,60 »	1	—	—
2 : 5	425 »	2,65 »	1	—	—
2 : 5	467 »	2,65 »	—	—	1
2 : 5	509 »	2,65 »	—	1	—
2 : 5	525 »	2,62 » (M. V. 2σ)	—	5	—
2 : 5	552 »	2,65 »	1	—	—
2 : 5	584 »	2,60 »	1	—	—
2 : 5	637 »	2,65 »	1	—	—
2 : 5	667 »	2,60 »	1	—	—
2 : 5	722 »	2,65 »	1	—	—

Auf Grund dieser Tabelle XXII würden wir das Maximum der Blauempfindung bei einer Expositionszeit des Reizes von 0,467—0,525 oder von 0,496 Secunden zu suchen haben.

Tabelle XXIII. Beobachter: Verfasser. Blaues Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
2 : 5	250 σ	2,60 Sec. (M. V. 0σ)	2	—	—
2 : 5	259 »	2,70 » (M. V. 0σ)	2	—	—
2 : 5	333 »	2,60 »	1	—	—
2 : 5	375 »	2,60 »	1	—	—
2 : 5	433 »	2,70 » (M. V. 0σ)	2	1	—
2 : 5	458 »	2,60 » (M. V. 0σ)	2	—	—
2 : 5	476 »	2,70 »	1	—	—
2 : 5	500 »	2,60 »	1	—	—
2 : 5	519 »	2,70 » (M. V. 0σ)	—	3	—
2 : 5	524 »	2,60 » (M. V. 0σ)	—	2	—
2 : 5	562 »	2,70 »	1	—	—
2 : 5	625 »	2,60 »	1	—	—
2 : 5	692 »	2,70 » (M. V. 0σ)	2	—	—
2 : 5	708 »	2,60 »	1	—	—
2 : 5	750 »	2,60 »	1	—	—

Auf Grund dieser Tabelle XXIII erreicht die Blauempfindung ihr Maximum bei einer Expositionszeit des Reizes von 0,519—0,524 oder von etwa 0,521 Secunden.

Tabelle XXIV. Beobachter: K. u. G. Gelbes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint dunkler	gleich	heller
1 : 2	178 σ	2,77 Sec. (M. V. 2 σ)	1	1(?)	—
1 : 2	215 »	2,80 »	1	—	—
1 : 2	266 »	2,77 » (M. V. 2 σ)	4	1(?)	—
1 : 2	308 »	2,75 »	1	—	—
1 : 2	356 »	2,77 » (M. V. 2 σ)	2	1(?)	—
1 : 2	396 »	2,75 »	1	—	—
1 : 2	449 »	2,80 »	1	—	—
1 : 2	485 »	2,75 » (M. V. 0 σ)	2	—	—
1 : 2	529 »	2,75 » (M. V. 0 σ)	—	4	—
1 : 2	538 »	2,80 » (M. V. 0 σ)	—	3	—
1 : 2	583 »	2,80 »	1	—	—
1 : 2	618 »	2,75 » (M. V. 0 σ)	1	1(?)	—
1 : 2	673 »	2,80 » (M. V. 0 σ)	2	—	—
1 : 2	718 »	2,80 » (M. V. 0 σ)	2	—	—
1 : 2	808 »	2,80 » (M. V. 0 σ)	3	—	—

Diese Tabelle XXIV beweist, dass die Gelbempfindung bei einer Expositionszeit des Reizes von 0,529—0,538 oder im Mittel von 0,534 Secunden ihr Maximum erreicht.

Tabelle XXV. Beobachter: Dr. W. u. Verf. Gelbes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint dunkler	gleich	heller
2 : 5	173 σ	2,70 Sec.	1	—	—
2 : 5	259 »	2,70 » (M. V. 0 σ)	3	1	—
2 : 5	303 »	2,70 »	1	—	—
2 : 5	346 »	2,70 » (M. V. 0 σ)	2	1(?)	—
2 : 5	389 »	2,70 »	1	—	—
2 : 5	433 »	2,70 » (M. V. 0 σ)	3	—	—
2 : 5	476 »	2,70 »	—	1	—
2 : 5	519 »	2,70 » (M. V. 0 σ)	1	5	—
2 : 5	562 »	2,70 »	2	—	—
2 : 5	607 »	2,70 »	2	1	—
2 : 5	649 »	2,70 »	1	—	—
2 : 5	692 »	2,70 »	1	—	—
2 : 5	736 »	2,70 » (M. V. 0 σ)	2	—	—
2 : 5	778 »	2,70 »	1	—	—

Aus dieser Tabelle XXV entnehmen wir, dass gelbes Licht bei einer Einwirkungsdauer von 0,476—0,519 oder im Mittel von 0,497 Secunden das Maximum der Empfindung erregt.

Von den mitgetheilten Resultaten sind, wie hier zunächst noch bemerkt werden muss, die in Tabelle XVII ff. enthaltenen mittelst einer von der bisherigen etwas abweichenden Methode gewonnen worden. Von der Voraussetzung ausgehend, dass die Ergebnisse der Dunkeladaptatinsversuche, wie für weißes und rothes Licht, so möglicher Weise auch für die übrigen Lichtarten sich bestätigen würden, schlug ich nämlich in der Bestimmung der Reizzeit, nach welcher die Grün-, Blau- und Gelbempfindung das Maximum ihrer Intensität erreicht, gewissermaßen den umgekehrten Weg ein wie bei der analogen Bestimmung für die Weiß- und Rothempfindung. Ich nahm jene Zeit als bekannt an (etwa gleich 519 bis 529$^{\sigma}$), stellte die ihr entsprechende Länge des Ausschnittes in der die Dauer des Vergleichsreizes bestimmenden rotirenden Scheibe ein und variirte die Sectorenbreite des die objective Helligkeit des Normalreizes regulirenden Episkotisters so lange, bis der Beobachter den Vergleichsreiz als dem Normalreiz e b e n gleich beurtheilte. Dann variirte ich unter Beibehaltung der Sectorenbreite des Episkotisters die Expositionszeit des Vergleichsreizes, um zu sehen, ob derselbe bei längerer und kürzerer Einwirkungsdauer nicht etwa auch gleich oder gar heller wie der Normalreiz erscheine. Unter den variirten Expositionszeiten kehrte natürlich auch ohne Vorwissen des Beobachters diejenige wieder, von der ausgegangen worden war. Die Tabellen XVII ff. zeigen offenbar, dass diese Methode sich bewährte und die ihr zu Grunde liegende Voraussetzung sich bestätigte.

Vergleichen wir nun die Gesammtergebnisse der einzelnen Tabellen unter einander, so finden wir wieder einen bedeutenden Unterschied zwischen der Zeit, welche weißes, und derjenigen, welche homogenes Licht auf das Auge einwirken muss, um das Maximum der Empfindung zu erregen. Jene schwankt in den verschiedenen Tabellen (X bis XIII) zwischen 0,253 und 0,288 Secunden und ist, wenn wir aus den am Schluss der einzelnen Tabellen gegebenen Mittelzahlen wieder das Mittel nehmen, gleich 0,270 Secunden zu setzen. Diese zeigt für die verschiedenen Farben kaum eine größere Variation als für jede einzelne Farbe in den verschiedenen Tabellen. Die

gesammte Variationsbreite der Mittelzahlen ist eingeschlossen zwischen den Grenzen (siehe Tab. XIV ff.) 0,496 und 0,546. Als Mittel der einzelnen Ergebnisse finden wir 0,523 Secunden[1]). Es ergibt sich also wieder wie bei den früher mitgetheilten Versuchen, dass die einzelnen homogenen Lichtarten ungefähr gleich lange Zeit einwirken müssen, um das Maximum der Empfindungsintensität zu erzeugen, und dass diese Zeit etwa doppelt so groß ist wie jene, welche weißes Licht zu dem gleichen Effect braucht. Es ergibt sich aber weiterhin auch eine auffallende Uebereinstimmung der absoluten Zahlen für die Reizzeiten, welche bei Dunkeladaptation und bei Helladaptation zur Erzeugung des Maximums der verschiedenen Empfindungen nöthig sind.

Dieses letztere Ergebniss wird nur verständlich bei der Annahme, dass die Intensität des Lichtreizes die Zeit, welche er bis zur Erregung der Maximalempfindung einwirken muss, völlig unbeeinflusst lässt; denn die andere Erklärung, dass die ungünstigeren Bedingungen, welche man für ein schnelles Ansteigen der Lichtempfindungen von der Helladaptation erwarten sollte, in den mitgetheilten Versuchen durch die größere Intensität der benutzten Lichtreize gerade compensirt worden seien, erschien von vornherein höchst unwahrscheinlich.

Ich versuchte daher, auf anderem Wege der Frage näher zu treten, ob die Intensität der Lichtreize einen Einfluss ausübe auf die Größe der Expositionszeit, bei welcher das Maximum der Empfindung erregt wird. Ergebnisse hierher gehöriger Versuche enthält bereits Tabelle XIII. Aber diese Versuche, abgesehen von ihrer geringen Zahl, befriedigten mich nicht recht. Denn die Intensitätsvariation, welche die Lichtreize von Tabelle XIII gegenüber den bei den vor-

[1]) Hierzu will ich bemerken, dass das Gesammtmittel aus den einzelnen Mittelzahlen auf die gewöhnliche Weise berechnet ist. Die am Schlusse jeder Tabelle gegebenen Zahlen dagegen bedeuten nur die Mitte zwischen den kleinsten und den größten Expositionszeiten des Vergleichsreizes, bei denen die Gleichheitsurtheile überwiegen, und die keine mittlere Expositionszeit einschließen, bei welcher der Vergleichsreiz überwiegend dunkler erscheint. Es dürfte nämlich in diesem Fall die Annahme gerechtfertigt sein, dass dasselbe Resultat auch nach der gewöhnlichen Methode der Mittelziehung gewonnen würde, wenn alle zwischen jenen Extremen liegenden Expositionszeiten in jeder Versuchsreihe gleichmäßig berücksichtigt werden könnten und nicht nur einzelne zufällig dem einen oder anderen Extrem näher liegende Expositionszeiten jeweilig in Betracht gezogen würden.

ausgehenden Versuchen verwendeten aufweisen, ist so gering, dass ein sehr merklicher Einfluss auf die in Rede stehende Expositionszeit kaum erwartet werden darf.

III. Neue Versuche bei Dunkeladaptation.

Ich benutzte daher dieselben Lichtreize, mit denen die bisher angeführten Helladaptationsversuche ausgeführt worden waren, um an ihnen einige Beobachtungen bei Dunkeladaptation ausführen zu lassen. Zu diesem Zwecke blieb die Versuchsanordnung völlig ungeändert. Es wurde nur durch übergehängte schwarze Tücher der Beobachter völlig in den Beobachtungskasten eingeschlossen. Die Versuche fanden an den dunklen Winterabenden statt, wo bei geschlossenen Vorhängen das Beobachtungszimmer selbst fast völlig verfinstert werden konnte und in dem Beobachtungskasten absolute Dunkelheit herrschte. Als Beobachter fungirten die Herren Geiger und Katzenellenbogen, deren Ergebnisse, da sie völlig übereinstimmen, in jeder der folgenden Tabellen neben einander aufgeführt werden.

Der Verlauf der Versuche im einzelnen war derselbe wie bei den früher beschriebenen Dunkeladaptationsversuchen. Auch die Anordnung der Tabellen ist die nämliche wie bisher.

Tabelle XXVI. Beobachter: K. und G. Weißes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 23	178 σ	2,32 Sec. (M. V. 2$^{\sigma}$)	2	—	—
4 : 23	265 »	2,32 » (M. V. 5$^{\sigma}$)	1	5	—
4 : 23	295 »	2,30 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	2	—	—
4 : 23	340 »	2,35 »	1	—	—
4 : 23	384 »	2,40 »	—	1(?)	—
4 : 23	413 »	2,35 »	1	—	—
4 : 23	453 »	2,35 »	1	—	—
4 : 23	490 »	2,35 »	1	—	—
4 : 23	516 »	2,30 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	2	—	—
4 : 23	527 »	2,35 » (M. V. 0$^{\sigma}$)	2	—	—
4 : 23	539 »	2,40 »	1	—	—
4 : 23	565 »	2,35 »	1	—	—
4 : 23	590 »	2,30 »	1	—	—
4 : 23	626 »	2,30 »	1	—	—

Aus dieser Tabelle XXVI ergibt sich, dass die Weißempfindung nach einer Exposition des Reizes von etwa 0,265 Secunden ihr Maximum erreicht.

Tabelle XXVII. Beobachter K. und G. Rothes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 23	190 σ	2,48 Sec. (M. V. 2σ)	2	—	—
4 : 23	235 »	2,45 »	1	—	—
4 : 23	256 »	2,50 » (M. V. 0σ)	3	1(?)	—
4 : 23	275 »	2,45 »	1	—	—
4 : 23	321 »	2,50 »	1	—	—
4 : 23	361 »	2,50 »	1	—	—
4 : 23	431 »	2,45 »	1	—	—
4 : 23	472 »	2,45 »	1	—	—
4 : 23	524 »	2,48 » (M. V. 2σ)	2	6	—
4 : 23	550 »	2,45 » (M. V. 0σ)	1	1	—
4 : 23	561 »	2,50 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 23	628 »	2,45 »	1	—	—
4 : 23	667 »	2,45 »	1	—	—

Nach dieser Tabelle XXVII erreicht die Rothempfindung ihr Intensitätsmaximum bei einer Expositionszeit des Reizes von etwa 0,524 Secunden.

Die Ergebnisse, welche in dieser und den folgenden Tabellen niedergelegt sind, wurden auf dieselbe Methode gewonnen wie die der Tabellen XVII ff.

Tabelle XXVIII. Beobachter K. und G. Grünes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 23	160 σ	2,50 Sec.	1	—	—
4 : 23	192 »	2,50 » (M. V. 0σ)	2	—	—
4 : 23	240 »	2,50 »	1	—	—
4 : 23	256 »	2,50 » (M. V. 0σ)	2	1	—
4 : 23	281 »	2,50 »	1	—	—
4 : 23	321 »	2,50 »	1	—	—
4 : 23	361 »	2,50 » (M. V. 0σ)	2	—	—

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 23	400 σ	2,50 Sec. (M. V. 0 σ)	2	—	—
4 : 23	440 »	2,50 »	1	—	—
4 : 23	481 »	2,50 »	1	—	—
4 : 23	521 »	2,50 » (M. V. 0 σ)	—	4	—
4 : 23	561 »	2,50 »	1	—	—
4 : 23	601 »	2,50 »	1	—	—
4 : 23	641 »	2,50 »	1	—	—

Auf Grund dieser Tabelle XXVIII muss grünes Licht etwa 0,521 Secunden einwirken, um das Intensitätsmaximum der Empfindung zu erregen.

Tabelle XXIX.

Beobachter: K. und G. Blaues Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 23	259 σ	2,70 Sec. (M. V. 0 σ)	2	—	—
4 : 23	279 »	2,65 »	1	—	—
4 : 23	343 »	2,68 » (M. V. 2 σ)	3	—	—
4 : 23	382 »	2,65 »	—	1(?)	—
4 : 23	425 »	2,65 »	1	—	—
4 : 23	476 »	2,70 »	1	—	—
4 : 23	522 »	2,68 » (M. V. 2 σ)	—	5	—
4 : 23	562 »	2,70 »	1	1	—
4 : 23	607 »	2,70 »	1	—	—
4 : 23	637 »	2,65 » (M. V. 0 σ)	3	—	—
4 : 23	720 »	2,50 »	1	—	—

Diese Tabelle XXIX besagt, dass die Blauempfindung bei einer Expositionszeit des Reizes von etwa 0,522 Secunden ihr Maximum erreicht.

Tabelle XXX.

Beobachter: K. und G. Gelbes Licht.

Objectives Helligkeits-verhältniss	Expositionszeit des Vergleichsreizes	Expositionszeit des Normalreizes	Zahl der Urtheile: Vergleichsreiz erscheint		
			dunkler	gleich	heller
4 : 23	179 σ	2,80 Sec.	1	—	—
4 : 23	269 »	2,80 » (M. V. 0^{σ})	2	—	—
4 : 23	314 »	2,80 »	1	—	—
4 : 23	359 »	2,80 »	1	—	—
4 : 23	449 »	2,80 »	1	—	—
4 : 23	520 »	2,80 » (M. V. 0^{σ})	—	2	—
4 : 23	538 »	2,80 » (M. V. 0^{σ})	—	3	—
4 : 23	583 »	2,80 »	1	—	—
4 : 23	629 »	2,80 » (M. V. 0^{σ})	2	—	—
4 : 23	673 »	2,80 »	1	—	—

Auf Grund dieser Tabelle haben wir die Zeit, welche gelbes Licht einwirken muss, um das Maximum der Empfindung zu erregen, zwischen 0,520 und 0,538 Secunden zu suchen d. h. etwa gleich 0,529 Secunden zu setzen.

Fassen wir die Ergebnisse von Tabelle XXVI—XXX zusammen, so finden wir wieder den charakteristischen Unterschied zwischen der etwa 0,265 Secunden betragenden Expositionszeit, bei welcher weißes Licht das Maximum der Empfindung erregt, und der etwa doppelt so langen, ungefähr 0,524 Secunden dauernden Einwirkung, welche homogenes Licht nöthig hat, um denselben Effect hervorzubringen. Die absoluten Zahlen stimmen ferner hinreichend mit den Ergebnissen der früheren Dunkeladaptationsversuche, bei welchen wesentlich schwächere Lichtreize benutzt wurden, überein, um eine Unabhängigkeit der zur Erzeugung des Empfindungsmaximums nöthigen Expositionszeit von der Intensität der Reize zu beweisen.

Bevor wir nun zur Besprechung des Gesammtresultats übergehen, mag die folgende Tabelle XXXI nochmals alle Mittelzahlen der einzelnen Tabellen wiedergeben. Die auf einander folgenden Verticalcolumnen enthalten die Resultate für weißes und für rothes, grünes, blaues, gelbes homogenes Licht. In den einzelnen Horizontalabschnitten folgen sich die Ergebnisse der bei Helladaptation, der bei Dunkeladaptation mit minimalen Lichtreizen und der bei Dunkeladaptation

mit intensiven Reizen angestellten Versuche. Außerdem ist vor jeder Horizontalreihe das objective Helligkeitsverhältniss zwischen Vergleichsreiz und Normalreiz angegeben, bei welchem dieselben als gleich beurtheilt wurden, wenn die Reizung gerade in dem Augenblick abgebrochen wurde, wo der Vergleichsreiz die zur Erregung des Maximums der Empfindung nöthige Zeit eingewirkt hatte.

Aus nebenstehender Tabelle XXXI können wir nun die sämmtlichen Hauptergebnisse der vorausgehenden Untersuchungen ablesen. Wir finden zunächst in keiner der einzelnen Verticalcolumnen eine bedeutendere Variation, die uns hindern könnte, den Satz aufzustellen, dass jeder qualitativ bestimmte Lichtreiz ohne Rücksicht auf seine Intensität und die Adaptationsverhältnisse des Beobachters eine höchstens innerhalb enger Grenzen variirende Expositionszeit besitzt, bei welcher er das Maximum der Empfindung erregt. Es zeigt sich ferner in der zweiten bis vierten Spalte der letzten Horizontalreihe eine so große Übereinstimmung der Zahlen, welche die Zeiten angeben, in denen die einzelnen homogenen Lichtarten die zugehörigen Maximalempfindungen erregen, dass die Annahme endgültig gerechtfertigt erscheint, die einzelnen Farbenempfindungen erreichten ihr Intensitätsmaximum bei ungefähr der gleichen Expositionszeit des Reizes.

Uebrigens will ich hier auf einen Umstand hinweisen, der in den Helladaptationsversuchen mit farbigen Lichtreizen hervortrat und die schroffe Gegenüberstellung farbigen und farblosen Lichtes einigermaßen zu stören geeignet ist.

Wie man nämlich aus Tabelle XIV—XXV ersieht, kommen bei Expositionszeiten, nach denen die Weißempfindung ihr Maximum erreicht, auch in den Versuchsreihen mit farbigen Lichtreizen bei Helladaptation vereinzelte Gleichheitsurtheile vor. Diese als bloße Versuchsfehler zu betrachten, hindert mich die Constanz ihres Auftretens in jeder Beobachtungsreihe, während sie doch in den gleichartigen Versuchen jeder Reihe nicht regelmäßig genug wiederkehren, um den Schluss zu rechtfertigen, es sei durch sie bereits ein Maximum der Farbenempfindung nach derselben Expositionszeit des Reizes erwiesen, nach welcher die Weißempfindung ihr Maximum erreicht. So musste ich mich denn begnügen, mir von meinen Beobachtern immer wieder versichern zu lassen und durch eigene Beobachtungen zu bestätigen,

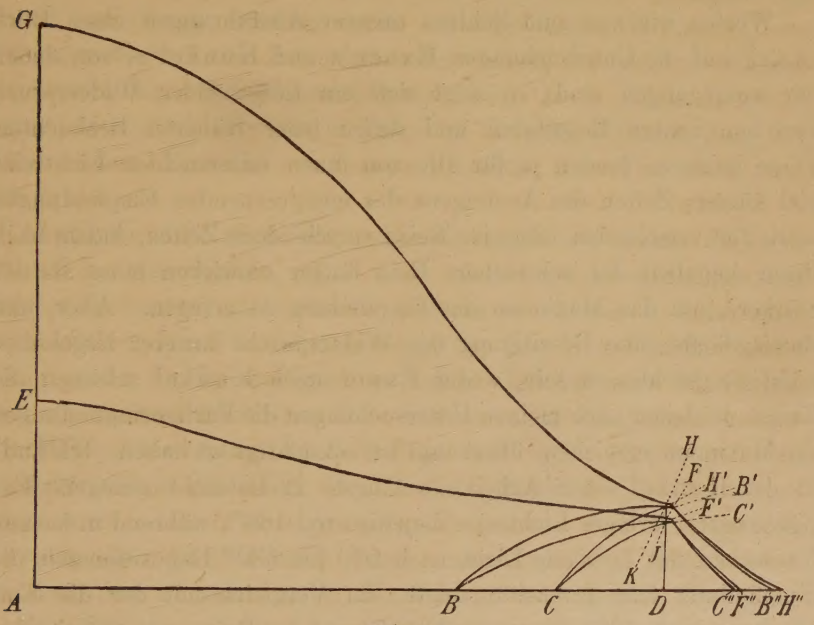
Tabelle XXXI.

	Objectives Helligkeitsverhältniss, das gerade noch als Gleichheit erscheinen kann	Zeiten, nach denen der Vergleichsreiz das Maximum der Empfindung hervorruft, d. h. dem Normalreiz gerade noch gleich erscheint, für				
		Weiß	homogenes Roth	homogenes Grün	homogenes Blau	homogenes Gelb
Helladaptation	1 : 2	0,269 (?) Sec.	0,519 Sec.	0,529 Sec.	0,523 Sec.	0,534 Sec.
	1 : 2	0,253 »		0,519 »		
	2 : 5	0,271 »	0,535 »	0,533 »	0,496 »	0,497 »
	2 : 5	0,288 »	0,546 »	0,519 »	0,521 »	
Dunkeladaptation bei minimalen Reizen	4 : 27	0,266 »	0,541 »	0,691 (?) »	0,543 »	0,573 »
	4 : 27	0,272 »		0,541 »		
	4 : 27	0,266 »				0,541 »
Dunkeladaptation bei intensiven Reizen	4 : 23	0,265 »	0,524 »	0,521 »	0,522 »	0,529 »
	Mittel	0,269 »	0,533 »	0,527 » wenn 0,691 unberücksichtigt bleibt	0,521 »	0,535 »

dass der farbige Vergleichsreiz bei einer Expositionszeit von 260—270$^{\sigma}$ zwar verhältnissmäßig hell erschien, aber meist (auch bei den Helladaptationsversuchen) selbst da, wo er als dem Normalreiz gleich beurtheilt wurde, nicht so hell, geschweige denn heller aussah wie bei einer etwa doppelt so langen Exposition.

Außer über die Zeit, welche ein Lichtreiz einwirken muss, um das Maximum der Empfindung zu erregen, geben aber endlich unsere Untersuchungen, wie sie in Tabelle XXXI kurz zusammengefasst sind, auch Rechenschaft über den Maximaleffect selbst, welchen ein Lichtreiz unter verschiedenen Bedingungen hervorrufen kann. Wir finden nämlich als objectives Reizverhältnis, bei welchem Vergleichsreiz und Normalreiz bei constanter Expositionszeit des letzteren gerade noch als gleich beurtheilt werden können, für einen Theil der Beobachter bei Helladaptation das Verhältniss 1 : 2, für den andern das Verhältniss 2 : 5. Bei Dunkeladaptation ist für jene das betreffende Reizverhältniss 4 : 23, für diese 4 : 27. Es scheinen also individuelle Unterschiede hier in Betracht zu kommen. Da aber $^4/_{23} : {}^4/_{27}$ nur wenig verschieden ist von $^1/_2 : {}^2/_5$, so folgt, dass die Veränderung des Verhältnisses der Reizintensitäten, welche noch als gleich empfunden werden können, beim Uebergang von der Hell- zur Dunkeladaptation bei allen Versuchspersonen ziemlich übereinstimmt. Der Vergleichsreiz nämlich, der bei Dunkeladaptation einem bestimmten Normalreiz gleich erscheinen kann, ist für die einen Beobachter 2,7, für die andern 2,8mal so klein als der Vergleichsreiz, welcher bei Helladaptation demselben Normalreiz gegenüber als gleich beurtheilt wird, wenn die Reizung nach der für Erregung des Maximums der Empfindung geeigneten Zeit abgeschnitten wird. Zur Erläuterung dieser Verhältnisse des Ansteigens der durch farbiges und farbloses Licht erregten Empfindungen bei Hell- und bei Dunkeladaptation diene die graphische Darstellung des Erregungsverlaufs in Fig. 4. Die Abscissen stellen die Expositionszeiten der Reize dar: AD bedeutet die Zeit, welche der Normalreiz noch einwirkt, nachdem er bei A schon die zur Erregung des Empfindungsmaximums nöthige Dauer besaß. EF und GH bezeichnen demgemäß den Verlauf der durch Ermüdung mehr und mehr herabgesetzten Empfindung bei Hell- bezw. bei Dunkeladaptation. Nachdem bei F und H der Reiz aufgehört hat

zu wirken, dauert der Einfluss des letzten Reizanstoßes noch eine sehr kurze Zeit fort. Demgemäß zeigen die Curven EF' und GH bis F' und H' noch keine auffallende Aenderung der Verlaufsrichtung, um dann jedoch nach F'' und H'' jäh abzufallen. BD und CD bedeuten die Expositionszeiten des farbigen und des weißen Vergleichsreizes (= 0,529 und 0,269 Secunden), bei denen die Empfindung ihr Maximum erreicht. BK und CK bezeichnen demgemäß den Verlauf



Figur 4.

der farbigen und weißen Vergleichsempfindung bei Dunkeladaptation bis zum Aufhören der Reizung. Dieser Augenblick (K) wird aber noch nicht mit dem Moment des Maximums der Empfindung zusammenfallen, sondern infolge der Nachwirkung der letzten Reizanstöße wird die Empfindung noch zunehmen bis B', wo Vergleichsempfindung und Normalempfindung gleich sind. Die Zeit des Verlaufs der Empfindung von K bis B' ist jedenfalls sehr klein und entzieht sich unserer Beobachtung. Das Analoge wie für die Curven BB' und CB' gilt nun auch für die Curven BC' und CC', welche den Verlauf der farbigen und weißen Vergleichsempfindung bei Helladaptation dar-

stellen. Die Ordinaten endlich $DI : AE$ und $DK : AG$ verhalten sich wie die objectiven Intensitäten von Vergleichsreiz und Normalreiz bei Hell- und bei Dunkeladaptation. Dagegen ist $AE : AG$ nicht gleich dem Verhältnis der Normalreize bei Hell- und bei Dunkeladaptation, sondern die letzteren sind einander gleich. Es müssten also, wenn die absoluten Werthe der Reize in der Zeichnung zum Ausdruck kommen sollten, $AE = AG$ und $DK = {}^4/_{27} AE$ gemacht werden.

Werfen wir nun zum Schluss unserer Ausführungen einen Blick zurück auf die Untersuchungen Exner's und Kunkel's, von denen wir ausgegangen sind, so zeigt sich ein tiefgehender Widerspruch zwischen unsern Resultaten und denen jener früheren Beobachter. Diese letzteren fanden ja für alle von ihnen untersuchten Lichtreize viel kürzere Zeiten des Ansteigens der entsprechenden Empfindungen sowie für verschieden intensive Reize verschiedene Zeiten, indem nach ihren Angaben der schwächere Reiz länger einwirken muss als der stärkere, um das Maximum der Empfindung zu erregen. Aber, und damit dürfte eine Beseitigung des Widerspruchs unserer Ergebnisse nicht ausgeschlossen sein, weder Exner noch Kunkel scheinen die Zeiten, in denen nach meinen Untersuchungen die Farbenempfindungen ihr Maximum erreichen, überhaupt berücksichtigt zu haben. Ich finde in der Kunkel'schen Arbeit als längste in Betracht gezogene Expositionszeit farbiger Lichtreize diejenige von 166^σ, während in meinen Versuchen mit farbigem Licht nach 520 bis 530^σ Expositionszeit die Empfindung eine Intensität zeigte, im Vergleich mit der die Empfindung nach 166^σ dauernder Einwirkung des Reizes als entschieden schwächer erschien. Wenn ich es deshalb dahingestellt lassen muss, ob Kunkel's Versuche Verschiedenheiten in den ersten Stadien der Farbenerregung richtig zu Tage gefördert oder ob die Schwierigkeiten seiner indirecten Methode störend auf seine Resultate zurückgewirkt haben, so kann ich doch dies behaupten, dass seine Angaben über den Einfluss von Intensitätsverschiedenheiten des Reizes auf die Zeit des Ansteigens der Empfindungen nicht einen Einfluss auf die Erreichung des Maximums der Empfindungsintensität betreffen, da dieses Maximum in seinen Versuchen wahrscheinlich gar nicht erreicht wurde.

Etwas anders steht es mit den Untersuchungen Exner's, die sich

auf weißes Licht beschränkten, da die Weißempfindung ja auch nach meinen Ergebnissen bei kürzerer Expositionszeit des Reizes ihr Maximum erreicht. Diese Expositionszeit wird von Exner in einigen Fällen wohl überschritten und er constatirt dann eine Wiederabnahme der Empfindung, indem er dieselbe einer schwächeren Normalempfindung gleichsetzt. Aber diese minder intensive Normalempfindung scheint er nicht durch Abstufung eines anfangs zu hellen Normalreizes bis zu dem Moment einer eben eintretenden Gleichheit mit dem Vergleichsreiz, sondern durch eine apriorische Einstellung des Normalreizes auf eine Intensität zu gewinnen, bei welcher Normalempfindung und Vergleichsempfindung zwar auch noch als gleich beurtheilt werden, aber nur in Folge der bei meiner Nachprüfung der Exner'schen Methode constatirten Breite der Unterschiedsschwelle.

Doch wie dem auch sein mag, die Ergebnisse meiner Versuche würden bestehen bleiben, selbst wenn ich die abweichenden Resultate anderer Beobachter nicht glaubte erklären zu können, so lange nicht in meiner eigenen Versuchsanordnung ein ihre Brauchbarkeit beeinträchtigender Fehler nachgewiesen wird. Ich will noch hinzufügen, dass ich in den mitgetheilten Untersuchungen nur demjenigen Moment der Helligkeitserregung durch farbige und weiße Lichtreize meine Aufmerksamkeit geschenkt habe, wo die Empfindungen das Maximum ihrer Intensität zeigen. Die Frage nach dem Ansteigen der Farbenqualität ist hier noch ebenso unberücksichtigt geblieben wie die nach den übrigen Stadien des Verlaufs der Helligkeitserregung.

Zum Schlusse möchte ich endlich die angenehme Pflicht erfüllen, allen denen, durch deren Theilnahme diese Arbeit ermöglicht und gefördert wurde, meinen herzlichsten Dank auszusprechen. Dieser Dank gebührt Herrn Geheimrath Wundt für das Interesse, welches er meinen Untersuchungen entgegenbrachte, und die mannigfache Anregung, die er mir dabei zu Theil werden ließ. Ferner danke ich meinen Beobachtern für die Ausdauer, mit der sie an den schwierigen und zeitraubenden Versuchen sich betheiligten.

Vita.

Geboren am 23. März 1878 zu Würzburg als Sohn des Lehrers G. Dürr protestantischer Confession, absolvirte ich im Jahre 1897 das alte Gymnasium zu Würzburg. Hierauf studirte ich an der Universität meiner Vaterstadt Philosophie, wobei ich durch Herrn Professor Külpe und Herrn Privatdocent Marbe in Vorlesungen, Instituts- und Seminarübungen, sowie persönlichem Verkehr die weitgehendste Anregung fand. Durch sie wurde ich hingewiesen auf das Studium der experimentellen Psychologie als einer sicheren Basis und der einzelnen Natur- und Geisteswissenschaften als einer unentbehrlichen Ergänzung des zum Betrieb der systematischen Philosophie nöthigen Wissens. Im Herbst 1899 siedelte ich an die Universität Leipzig über, um besonders im psychologischen Institut des Herrn Geheimrath Wundt den Betrieb der experimentellen Psychologie theoretisch und praktisch in noch weiterem Umfang kennen zu lernen. Daneben besuchte ich Vorlesungen über Philosophie, Psychologie, Geschichte, sowie namentlich über die einzelnen naturwissenschaftlichen Disciplinen. Auch in der höheren Mathematik suchte ich mir die nöthigsten Kenntnisse zu erwerben. Besonders aber war ich bestrebt, meine Ausbildung auch durch praktisches Arbeiten in dem zoologischen Institut des Herrn Professor Chun, im physikalischen Institut des Herrn Professor Wiener, in der Anatomie bei Herrn Geheimrath His, sowie durch Theilnahme an philosophischen Seminarübungen bei Herrn Geheimrath Heinze, Herrn Professor Volkelt, Herrn Professor Barth und den H. H. Privatdocenten Richter und Störring zu vervollständigen. Im Sommersemester 1901 erhielt ich durch Vermittlung von Herrn Geheimrath Wundt die freigewordene Stellung des zweiten Assistenten am psychologischen Institut, der ich seither mannigfache wissenschaftliche Anregung verdanke.

Ernst Dürr.

Druck von Breitkopf & Härtel in Leipzig.